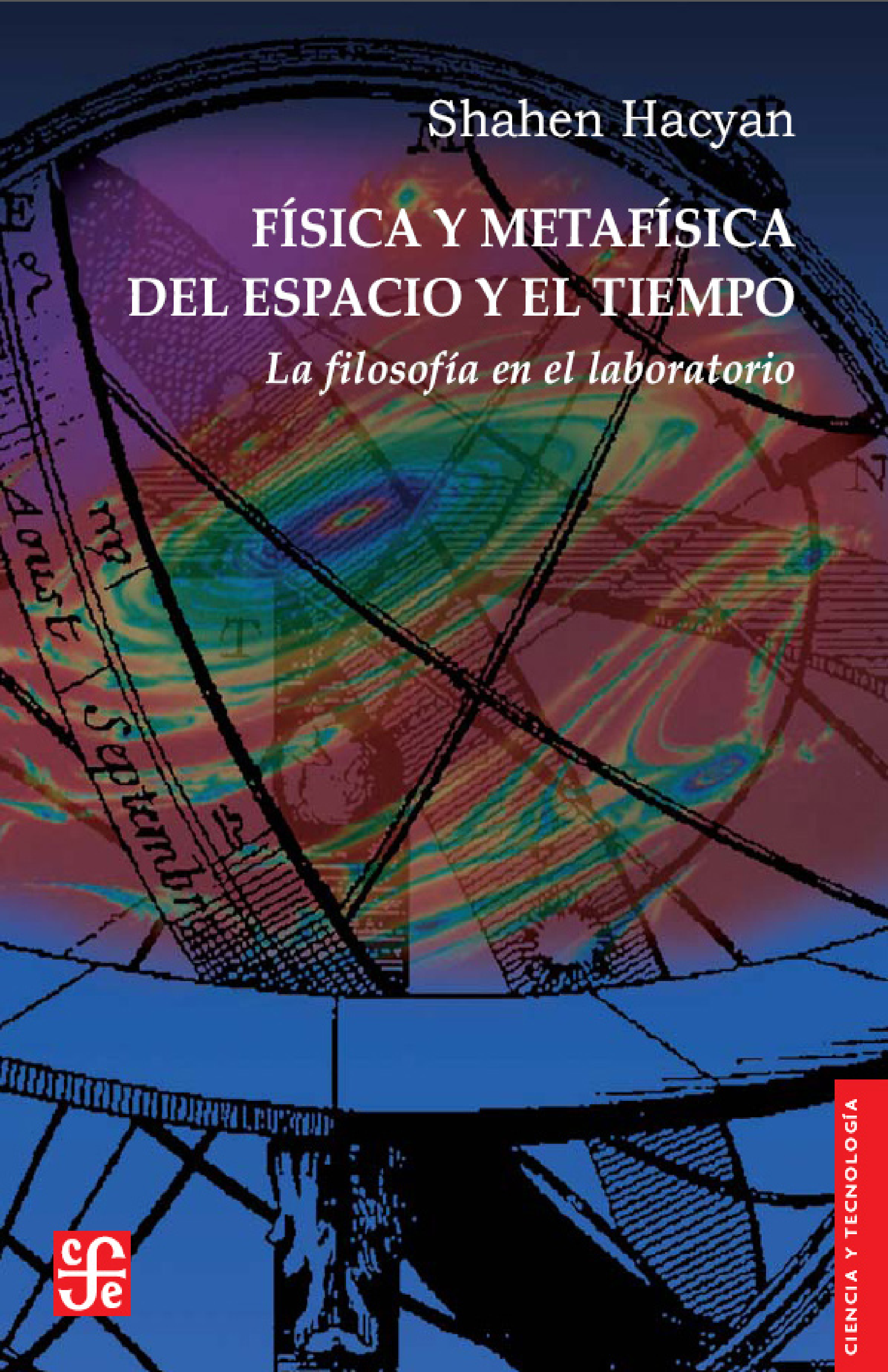

Shahen Hacyan
FÍSICA Y METAFÍSICA DEL ESPACIO Y EL TIEMPO
La filosofía en el laboratorio
CIENCIA Y TECNOLOGÍA
cfe

Acerca del autor

Shahen Hacyan es doctor en física teórica por la Universidad de Sussex, Inglaterra, el autor es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias e investigador del Instituto de Física de la UNAM. A la fecha tiene siete títulos publicados en las colecciones de ciencia del FCE, y ha realizado una labor notable en divulgación científica, la cual comprende colaboraciones sobre diversos temas tanto en revistas como en una interesante sección de ciencia en un diario de la ciudad de México.

Física y metafísica del espacio y el tiempo

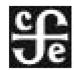
La filosofía en el laboratorio

Shahen Hacyan



Primera edición, 2004
Primera edición electrónica, 2011

Carretera Picacho-Ajusco, 227; 14738 México, D. F.
Empresa certificada ISO 9001:2008


www.fondodeculturaeconomica.com

Comentarios:
editorial@fondodeculturaeconomica.com
Tel. (55) 5227-4672



ISBN 978-607-16-0501-6
Hecho en México - *Made in Mexico*

Para Arturo, Esther y León

Sócrates: Uno, dos, tres, pero nuestro cuarto, querido Timeo… ¿dónde está?

Platón, *Timeo* (17 a)

Agradecimientos

El presente libro es producto de muchas discusiones con colegas y amigos, y de meditaciones propias. Algunas de las ideas expuestas aquí fueron esbozadas en el pasado en diversas conferencias y publicaciones mías; las he retomado para desarrollarlas sin todas las restricciones prácticas que imponen el espacio y el tiempo.

Este trabajo fue posible gracias al apoyo constante de la Universidad Nacional Autónoma de México, institución pública que me ha proporcionado las condiciones necesarias para desarrollar mi carrera profesional con plena libertad de investigar, especular y ejercer labores filosófico-naturales. Empecé a escribir el presente libro durante un semestre sabático que tuve el privilegio de pasar en la École Normale Supérieure, en París, por lo que deseo también agradecer la hospitalidad de esta prestigiada institución y, en particular, la invitación de Serge Haroche a su afamado laboratorio de física cuántica, lugar de lo más apropiado y estimulante para desarrollar y concretar ideas sobre la filosofía natural moderna.

Quiero agradecer muy especialmente a Déborah Dultzin, Beatriz Loria y Esperanza Verduzco la minuciosa lectura que hicieron del manuscrito; sus atinados comentarios y críticas permitieron aclarar varios puntos oscuros y mejorar el escrito. Por supuesto, la responsabilidad final del texto es enteramente mía.

Last but not least (como dicen los angloparlantes), agradezco al Fondo de Cultura Económica y a su dinámica coordinadora editorial, María del Carmen Farías, el apoyo de largos años a mis actividades literarias.

Shahen Hacyan
Ciudad de México
agosto de 2004

Introducción

Este libro trata del espacio y el tiempo —o espacio-tiempo, según suele decirse—, así como de la realidad objetiva y el entendimiento científico, todo ello en el contexto de la física moderna y la filosofía no tan moderna.

Los filósofos, a lo largo de la historia, trataron de entender cómo se relaciona nuestra mente con el mundo sensible. Surgieron diversas doctrinas, unas enfrentadas a otras, sin llegar a consenso alguno. Finalmente, la mecánica desarrollada por Galileo y Newton en el siglo XVII condujo a una nueva visión del mundo, tan exitosa que los problemas ontológicos quedaron relegados a un segundo plano. Lo que en esa época todavía se conocía como "filosofía natural" empezó a separarse del resto de la filosofía y tomar su propia forma para transformarse en lo que ahora llamamos física.

Para esos nuevos filósofos de la naturaleza, el espacio era un mero escenario en el que se mueven los objetos materiales, y el tiempo un parámetro con el cual se describe matemáticamente su movimiento. Un siglo después de la muerte de Newton, la nueva ciencia ya había desbordado el ámbito de las discusiones filosóficas y empezaba a encontrar aplicaciones inesperadas, propiciando una revolución tecnológica que modificó profundamente las condiciones sociales y el entorno natural, a tal punto que Karl Marx pudo sentenciar: "Los filósofos sólo han interpretado al mundo de diversas maneras; de lo que se trata es de cambiarlo."[1]

Pero, no obstante sus notables éxitos, la mecánica newtoniana fue cuestionada por varios filósofos, entre los cuales cabe mencionar a George Berkeley como representante típico de la corriente idealista. Berkeley argumentó que si conocemos el mundo sólo a través de nuestras percepciones y éstas son producidas por la mente, podemos prescindir de la materia y suponer que no existe más realidad que nuestras ideas. A pesar de su posición extrema, hay que reconocer

que Berkeley señaló claramente lo que había sido un problema fundamental para toda filosofía de la ciencia: ¿es el mundo que percibimos la imagen fiel de una realidad objetiva, o es una ilusión producida por nuestra mente? La respuesta depende esencialmente del punto de vista filosófico que se adopte. Para los idealistas, todo es producto de la mente y el mundo una especie de alucinación colectiva. En cambio, para los materialistas existe una realidad objetiva independiente del sujeto, cuya percepción es sólo un reflejo más o menos exacto de ella.

Sea el mundo realidad o ilusión, no es evidente cómo nuestra mente construye (o reconstruye) la imagen de aquello que percibimos, y cómo se produce el entendimiento. Al respecto, hay diversas posiciones filosóficas encontradas. Según los filósofos *racionalistas* como Descartes y Leibniz, existen verdades que descubrimos antes de comprobarlas por medio de los sentidos, lo cual implica que poseemos ideas innatas. En cambio, para los filósofos *empiristas* como Locke y Hume, el entendimiento humano se construye a partir de las percepciones, por lo que nuestro entendimiento es posterior a la experiencia sensorial.

En medio de esas dos posiciones antagónicas se sitúa el vasto sistema filosófico de Immanuel Kant, quien sostuvo que la mente es la que construye el conocimiento del mundo a partir de las sensaciones. El punto esencial de su tesis es que nuestro conocimiento está basado tanto en lo que aportan nuestros sentidos, como en estructuras innatas que permiten procesar esa información. Kant distinguió claramente entre las cosas como apariencias y *las cosas en sí* que no son directamente perceptibles pero originan las sensaciones. En ese contexto, uno de los aspectos más revolucionarios de su obra en cuanto a su relación con la física es la tesis de que el espacio y el tiempo no son propiedades de las cosas en sí, sino "formas de percepción": condiciones de la sensibilidad del sujeto que le permiten ordenar el conjun-

to de sus percepciones y darle sentido al mundo aprehendido.

En la época en que Kant escribió su famosa *Crítica de la razón pura* —obra con la que se propuso encontrar los límites de la razón humana—, la única ciencia que se había desarrollado exitosamente era la física newtoniana. Si bien sus tesis principales todavía están sujetas a discusión, su concepción del mundo no se contradice con la física moderna. Esto es lo que intentaremos mostrar en los capítulos siguientes.

* * *

La física moderna se basa en dos teorías fundamentales, la relatividad y la mecánica cuántica, que cambiaron por completo nuestras ideas sobre el espacio, el tiempo y la realidad física. En la teoría de la relatividad no existen un espacio y un tiempo absolutos, sino distancias e intervalos que dependen de cada observador en un espacio-tiempo de cuatro dimensiones; más aún, en la teoría generalizada de la relatividad, ese espacio-tiempo ya no es un simple escenario de los procesos físicos sino posee propiedades dinámicas relacionadas directamente con su geometría. La otra gran teoría de la física moderna, la mecánica cuántica, describe el comportamiento de los átomos y las partículas subatómicas, y nos ha revelado un mundo microscópico en el cual espacio y tiempo se manifiestan sólo como variables matemáticas, y donde conceptos como medición y realidad física pierden su sentido habitual.

La relatividad de Einstein es un modelo de precisión matemática: si bien sus postulados básicos no se amoldan al "sentido común", son perfectamente claros y es posible construir con ellos una teoría completa y del todo coherente. La situación es muy distinta para la mecánica cuántica; a pesar de sus impresionantes éxitos, sus principios funda-

mentales contradicen tan radicalmente el sentido común que, desde sus inicios, propició la aparición de diversas interpretaciones rivales. Hasta ahora, la llamada "interpretación de Copenhague" es la que se ha impuesto no obstante sus aparentes paradojas; al comienzo fue aceptada por razones puramente pragmáticas, pero con el tiempo ha pasado todas las pruebas a las que ha sido sometida.

* * *

El propósito de este libro es describir la nueva realidad revelada por la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica, y situar los conocimientos más recientes de la física en el esquema filosófico que Kant desarrolló un siglo antes del descubrimiento de los átomos. Con este propósito, señalaremos el hecho notable de que la física moderna es compatible con las tesis kantianas, particularmente la interrelación entre observador y mundo sensible, y la concepción del espacio y el tiempo como formas de percepción.

Sin entrar todavía en más detalles, baste destacar que, de acuerdo con la interpretación de Copenhague, la realidad atómica que percibimos depende parcialmente de nuestra forma de observar y no se puede disociar de ella, por lo que no existe una frontera bien definida entre sujeto y objeto observado. Por otra parte, las correlaciones espaciales que se manifiestan entre sistemas atómicos contradicen nuestros conceptos comunes del espacio; asimismo, el tiempo sólo se interpreta como un parámetro y puede correr en dos direcciones, ya sea hacia el pasado o hacia el futuro.

Hasta hace un par de décadas todo lo anterior parecía restringido al estrecho ámbito de las discusiones académicas. Pero ahora, gracias a los grandes avances en física atómica y óptica cuántica, tenemos la posibilidad de realizar en el laboratorio muchos experimentos reales que antes no pasaban de ser *experimentos mentales*. Ya no se trata de discu-

rrir y especular, sino de diseñar experimentos que permitan comprobar los extraños efectos predichos por la mecánica cuántica. La física moderna nos presenta una nueva y singular oportunidad de hacer filosofía en el laboratorio.

En resumen, el concepto de realidad física, tal como lo entendemos, toca fondo en el mundo atómico, donde es más notoria la interdependencia entre realidad y sujeto. Por supuesto Kant no estaba en condiciones de prever los avances de la ciencia moderna y nunca imaginó los límites que puede alcanzar la razón humana con la ayuda de las matemáticas. Se habría sorprendido de ver cómo la física cuántica ha logrado describir, con asombrosa precisión, los fenómenos de un mundo todavía insospechado hace un siglo.

Éstos serán los temas que abordaremos a continuación. En los primeros cinco capítulos presentaremos las concepciones del espacio, el tiempo y la materia desarrolladas por los filósofos naturales y los matemáticos hasta finales del siglo XIX, con atención especial en las aportaciones de Kant. En los siguientes esbozaremos los principios básicos de la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica para, a continuación, presentarlos en el contexto de la física moderna. En los últimos capítulos volveremos a las concepciones de Kant.

[1] Karl Marx, *Tesis sobre Feuerbach,* 1845.

I. Espacio

El diámetro del Aleph sería de dos o tres centímetros, pero el espacio cósmico estaba ahí, sin disminución de tamaño.

J. L. Borges, *El Aleph*

Pitágoras y Euclides

Se sabe poco de la vida del mítico Pitágoras, quien vivió en el siglo VI a. C., y menos de sus enseñanzas filosóficas, que prefería mantener en secreto en el círculo de sus discípulos. Se le atribuye el descubrimiento de una armonía existente entre el mundo de los números y el mundo sensible, cuyo paradigma es la relación numérica de las notas musicales producidas por una cuerda vibrante. Pitágoras intuyó que una relación semejante debía existir también entre los planetas: según la leyenda, podía escuchar la música de los cuerpos celestes. Sea lo que fuere, tal parece que a él debemos la profética visión de que la naturaleza se puede describir por medio de las matemáticas, lo cual se comprobaría dos milenios después de su paso por el mundo.

También se le atribuye el famoso teorema que lleva su nombre y que dice explícitamente: "para todo triángulo rectángulo, la suma de los cuadrados de los catetos es igual al cuadrado de la hipotenusa". Se sabe que este resultado ya era conocido por los babilonios, pues se han encontrado varias tabletas que lo mencionan, pero ellos sólo reportaron algunos casos particulares y no parece que hayan demostrado ese teorema en general. Como veremos más adelante, el teorema de Pitágoras resultó ser de suma importancia en geometría, ya que permite calcular algo tan fundamental como es la distancia entre dos puntos.

Después de estos inicios envueltos en el misterio, el siguiente acontecimiento crucial en las matemáticas fue la aparición de los Elementos de Euclides, quien vivió alrededor del 300 a. C. y es sin duda el matemático más importan-

te de la Antigüedad. Gracias a ese libro, que tanto influyó en la historia humana, la geometría alcanzó el grado de ciencia.

Euclides estableció una forma de razonar que hasta la fecha es un modelo de precisión lógica. El método consiste en definir primero, con toda claridad, algunos conceptos fundamentales basados en ideas que todos tenemos intuitivamente. A continuación se postulan unos pocos axiomas, o postulados, sencillos y evidentes, como verdades que uno acepta sin necesidad de cuestionar. Luego, a partir de esos mismos postulados, se combinan los conceptos de acuerdo con unas reglas simples de lógica, hasta formular y demostrar un teorema. Así, demostrando un teorema tras otro, se construye el gran edificio de las matemáticas con los ladrillos de las definiciones y las reglas básicas para combinarlas entre sí.

Siguiendo con este esquema, los *Elementos* empiezan con varias definiciones: qué es un punto, una línea, una recta, una superficie, un ángulo, un círculo, etc. A continuación, provisto de estas definiciones, Euclides ofrece al lector cinco postulados básicos, a partir de los cuales irá demostrando los teoremas de la geometría y revelando las propiedades del espacio.

Los cuatro primeros postulados de los *Elementos* son muy claros:

1. Por dos puntos pasa una línea recta.
2. Se puede prolongar una línea recta finita con otra línea recta.
3. Se puede construir un círculo con cualquier centro y radio.
4. Todos los ángulos rectos son iguales entre sí.

Luego, prácticamente de la manga, Euclides saca un quinto postulado, bastante embrollado, que tiene que ver con la posibilidad de que dos rectas se crucen en algún punto:

5. Si una recta cruza dos rectas de tal modo que los ángulos interiores en un mismo lado suman menos que dos ángulos rectos, las dos rectas prolongadas indefinidamente se cruzan en el lado donde los dos ángulos suman menos que dos rectos.

El quinto postulado contrasta con la simplicidad de los cuatro anteriores. El lector no puede evitar la impresión de que Euclides no tuvo más remedio que incluirlo sólo para no caer en contradicciones posteriores. Obviamente, es un añadido del cual habría sido mejor prescindir; tan es así que Euclides logra posponer su uso hasta la proposición 28, donde tiene que recurrir a él por vez primera.

Lo ideal hubiera sido demostrar ese engorroso postulado a partir de los cuatro anteriores, para que así dejara de ser un axioma. Ése es el camino que trataron de seguir los matemáticos de los siguientes siglos, pero ninguno tuvo éxito. Entre los muchos ataques al quinto postulado, vale la pena mencionar el de Proclus, filósofo bizantino del siglo V de nuestra era, quien logró dar un pequeño paso adelante mostrando que es enteramente equivalente a otro postulado, más simple que el originalmente propuesto por Euclides: "Dada una línea recta y un punto que no se encuentra sobre ella, se puede trazar exactamente una recta por ese punto que sea paralela a la línea recta."

Líneas rectas, puntos, paralelas… Todos tenemos una idea de a qué corresponden estos conceptos. Podemos imaginarnos perfectamente dos rectas paralelas que ni se acercan ni se alejan: ésa es su definición. Pero, ¿cómo podemos saber que existen paralelas? Para el profano de las matemáticas, la respuesta es simple: las paralelas existen porque las podemos trazar sobre una hoja de papel. Sin embargo, nada nos

garantiza que al prolongar cada una de las rectas sobre una hoja de extensión tan grande como el Universo, éstas no empiecen a acercarse o a alejarse en algún lugar. Es cierto que nada nos impide concebir un espacio en el que las paralelas permanezcan siempre paralelas; ese imaginado espacio será el espacio de Euclides. La duda que queda, empero, es si el Universo en que vivimos es realmente un espacio euclidiano. Afirmar eso no era posible mientras quedara el escollo del quinto postulado. Si se lograba demostrarlo, se demostraría también que todo espacio es necesariamente euclidiano y que no hay lugar, ni en el mundo material ni en el mundo de las ideas matemáticas, para otro tipo de espacios. Pero no resultó ser así.

* * *

Después de Euclides y otros grandes matemáticos de la Grecia antigua, transcurrieron muchos siglos en la Europa cristiana sin que ocurriera nada notable en las ciencias. Por fortuna, el mundo árabe conoció un importante desarrollo científico, principalmente a partir del siglo VIII; en matemáticas, los árabes se adelantaron en muchos aspectos a su resurgimiento en la Europa del Renacimiento. A ellos se debe la creación del álgebra, otra importante rama de las matemáticas, así como los primeros intentos de unirla con la geometría.

La conjunción de las dos grandes ramas conocidas en aquellos tiempos, el álgebra y la geometría, tomó su forma definitiva con la geometría analítica cuyos inicios se atribuyen a René Descartes. La gran ventaja de esta técnica es que a cada curva se le asocia una ecuación algebraica, por lo que las propiedades de las figuras se pueden estudiar tanto con la geometría clásica, como lo hacían Euclides y sus seguidores, como por medio del álgebra.

En la geometría analítica, cada punto en un plano está representado por sus coordenadas, que son dos números que permiten localizarlo con respecto a un sistema de ejes predeterminados. Si se trata de un punto en el espacio tridimensional, entonces se utilizan tres números como coordenadas. Lo esencial es que la distancia entre dos puntos se determina por medio del teorema de Pitágoras, a partir de las coordenadas de ambos. La relación tan fundamental entre álgebra y geometría sería imposible sin ese teorema que asocia distancias con coordenadas numéricas.

La geometría analítica fue extremadamente fructífera y condujo, en la generación posterior a Descartes, al siguiente gran avance en matemáticas: el cálculo diferencial e integral, desarrollado por Newton y Leibniz en forma simultánea e independiente.[2]

En cuanto a la esencia misma del espacio, el mismo Descartes tomó una posición cercana a la de Aristóteles. Negó la existencia del vacío, lo cual lo llevó a identificar el espacio con la extensión material. El espacio todo estaría lleno de aire burdo, como el que respiramos en la Tierra, y un "aire sutil", el Éter, que rellenaría todo el Universo. Esta identificación de espacio con materia, sea ésta etérea, fue duramente criticada por Newton, como veremos en capítulo III.

* * *

Después de tantos avances notables, parecía que había llegado el momento de saldar viejas cuentas con el molesto quinto postulado de Euclides. Empero, el problema siguió trayendo de cabeza a los mejores matemáticos. Para el siglo XVIII, ya se había vuelto un "escándalo de la geometría elemental", en palabras del matemático francés D'Alembert. Su colega y compatriota Legendre le dedicó al asunto una buena parte de su vida profesional, sin éxito, pero al menos encontró una nueva forma equivalente del quinto postulado:

“La suma de los ángulos de un triángulo es igual a dos ángulos rectos (180 grados)”. Cosa que los escolares aprenden en la escuela.

Finalmente, a principios del siglo XIX, algunos matemáticos visionarios se propusieron ver el problema desde una nueva perspectiva. Ante tantos fracasos anteriores, quedaba aún una vía por explorar: ¿por qué no olvidarse del quinto postulado y ver hasta dónde se puede llegar sin él? Si en algún momento surge un resultado contradictorio, entonces todo lo que restaría por hacer sería regresar camino y, a partir de la contradicción, demostrar la necesidad del quinto postulado. Ése es un método usado con frecuencia en matemáticas y se llama “reducción al absurdo”.

El gran matemático Karl Friedrich Gauss, alrededor de 1817, retomó el viejo problema desde esa nueva perspectiva. Pronto se convenció de que el quinto postulado es independiente de los cuatro anteriores y que, por lo tanto, no había razón para aferrarse a él. Si uno se olvida de él, no llega a nada contradictorio, sino a una nueva geometría en la que se puede definir las paralelas de otra forma. Pero, curiosamente, Gauss nunca publicó su trabajo; quizás no quería contradecir la geometría euclidiana, tan incuestionable en su época.

Corresponde a János Bolyai y Nikolai Lobachevski, quienes trabajaron independientemente y sin nunca conocerse, el honor de haber publicado los primeros estudios sobre geometrías que no cumplen con el quinto postulado. Ellos también se preguntaron qué pasaría si se descartara el molesto postulado, y el resultado fue sorprendente. Lejos de caer en contradicciones, apareció una nueva e insospechada geometría, perfectamente consistente y coherente; una geometría no euclidiana de una gran riqueza y complejidad. “He descubierto cosas tan sorprendentes que quedé impresionado... de la nada creé un extraño mundo nuevo”, escribió Bolyai a su padre, también matemático. Pero cuando Bolyai comunicó su descubrimiento a Gauss, la respuesta que

obtuvo le resultó decepcionante: el gran matemático alabó su trabajo, pero le informó que él ya había obtenido esos mismos resultados años atrás, aunque nunca los había publicado.

El nuevo mundo de la geometría no euclidiana también fue descubierto, en la misma época, por Lobachevski. Pero su trabajo, que data de 1829, pasó desapercibido durante varios años por estar escrito en su lengua natal y publicado en una oscura revista de la Universidad de Kazan, en Rusia. Incluso fue despreciado en los círculos académicos de su patria y tuvo que esperar una década hasta que apareciera una traducción al francés; sólo entonces el medio científico tomó conocimiento de su obra.

Lobachevski, en ese trabajo clásico, desarrolló lo que llamó "geometría imaginaria", una geometría en la que no se recurre al quinto postulado. Por el contrario, propuso una nueva definición de paralela: "Todas las rectas trazadas por un mismo punto en un plano pueden distribuirse, con respecto a una recta dada en ese plano, en dos conjuntos: rectas que cortan la recta dada y rectas que no la cortan. La recta que corresponde al límite común entre esos dos conjuntos es la *paralela* a la recta dada". De acuerdo con esta definición, resulta que existen dos paralelas a una recta dada, una de cada lado del punto dado (figura I.1).

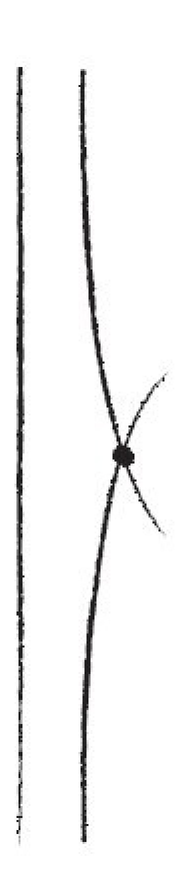


Figura I.1

Es notable que Lobachevski no quería permanecer en el marco de las construcciones mentales, ya que propuso comprobar astronómicamente la verdadera geometría del Universo midiendo los ángulos de grandes triángulos formados por dos puntos de la órbita terrestre y una estrella. Para la estrella Keida en la constelación de Erídano, comprobó, con los datos astronómicos a su disposición, que la suma de los ángulos del triángulo así construido no difería de 180° más que por un minuto de arco, lo cual no podría distinguirse de posibles errores de medición. Aunque no podía sacar ninguna conclusión con los recursos técnicos de la astronomía de su época, Lobachevski manifestó, en forma profética, su confianza en que se pudiese comprobar la verdadera geome-

tría del Universo en el futuro, midiendo distancias mucho mayores y con mejor precisión.

* * *

Los *Elementos* de Euclides estudian la geometría sobre una superficie plana de dos dimensiones, y las generalizaciones a una tercera dimensión aparecen sólo en el capítulo once. Asimismo, curvar una hoja sobre la cual se realizan demostraciones geométricas no parecía presentar una dificultad específica.

Las geometrías no euclidianas describen esencialmente espacios con una curvatura intrínseca. En dos dimensiones, la existencia de un espacio curvo es algo bien conocido y no tiene ningún misterio; el ejemplo más simple es el de la superficie de la Tierra. Pero no olvidemos que los humanos tardaron muchos siglos en darse cuenta de que la Tierra es redonda y no plana; así también los geómetras creían que el espacio es plano.

La superficie terrestre es un espacio curvo de dos dimensiones contenido en el espacio común de tres dimensiones. La curvatura es cuestión de escalas: en regiones pequeñas de la Tierra, su superficie puede tomarse como plana para todo fin práctico: los mapas de las ciudades dan una idea muy correcta de las distancias. En cambio, la curvatura se manifiesta al describir superficies muy grandes; como es bien sabido, en los mapas planos resulta imposible "aplanar" un continente entero sin deformar las distancias; las regiones polares se ven magnificadas y una isla relativamente pequeña como Groenlandia parece ser más grande que Europa.

La superficie de una esfera es fácil de visualizar y podemos tomarla como ejemplo para ilustrar algunas propiedades básicas de un espacio curvo. Cualquier punto sobre la superficie terrestre se determina con dos coordenadas, que

suelen ser la longitud y la latitud. Para medir la distancia entre dos puntos, se puede recurrir al teorema de Pitágoras; si bien éste se aplica sólo a superficies planas, también es válido en una región de la superficie terrestre lo suficientemente pequeña para que parezca plana. Para fijar las ideas, notemos que la fórmula para medir la hipotenusa *dl* de un triángulo rectángulo cuyos catetos valen *dx* y *dy* está dada por la fórmula:[3]

$$dl^2 = dx^2 + dy^2.$$

Su generalización a un triángulo pequeño sobre la superficie terrestre toma la forma:

$$dl^2 = R^2(d\theta^2 + \text{sen}^2\theta \; d\Phi^2),$$

donde R es el radio de la Tierra, y θ y Φ son la longitud y latitud respectivamente (figura I.2).

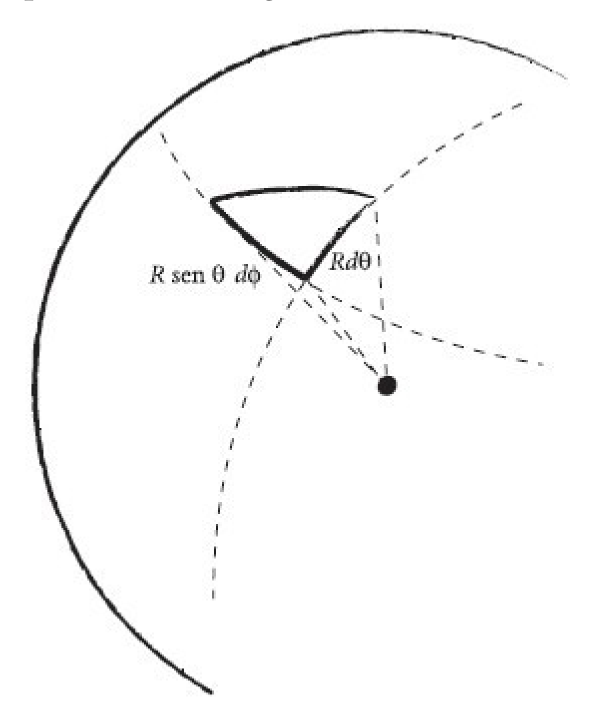


Figura I.2

Ahora bien, siempre se pueden unir dos puntos dados, no necesariamente muy cercanos, por una curva. ¿Cómo medir la longitud de una curva? La idea es medir segmentos de la

curva que sean lo suficientemente pequeños para que parezcan rectas, y luego, en un siguiente paso, sumar todos los segmentos para obtener la longitud total de una curva. Lo importante en este proceso es que la longitud se puede definir sin ambigüedad como el límite obtenido al hacer cada segmento cada vez más pequeño y su número total cada vez más grande. Este proceso se puede aplicar con toda exactitud y rigor matemático utilizando las poderosas técnicas del cálculo diferencial e integral desarrolladas por Newton y Leibniz en el siglo XVII.

Lo importante es que se puede definir rigurosamente la longitud de una curva que une dos puntos sobre una superficie curva. El siguiente paso consiste en generalizar el concepto de recta, para lo cual recordaremos lo que todos hemos aprendido en la escuela: la recta es la curva de menor longitud entre dos puntos. Esta definición involucra sólo un concepto: longitud, por lo que la noción de recta puede generalizarse en una forma bastante obvia: como una "curva de mínima longitud" o, en lenguaje matemático, "geodésica". Lo esencial es que esta definición se aplica a cualquier tipo de superficie curva; si disponemos de una fórmula que generaliza el teorema de Pitágoras y nos permite medir distancias sobre la superficie, siempre podemos encontrar las geodésicas correspondientes. Por ejemplo, para la superficie de una esfera, es evidente que la curva de mínima longitud que une dos puntos dados es el arco máximo que pasa por esos dos puntos (véase la figura I.3).

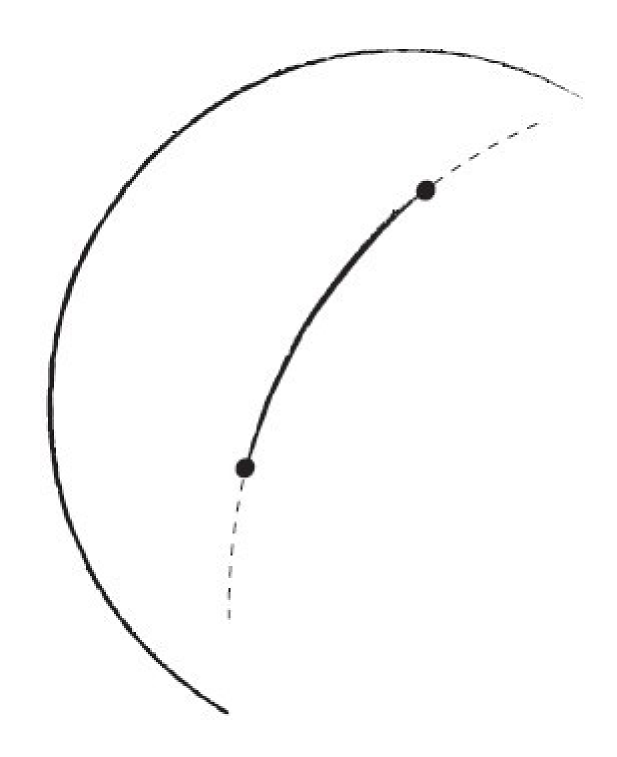


Figura I.3

Ahora se ve por qué no tiene sentido definir paralelas en un espacio curvo como la superficie terrestre. El quinto postulado sólo se aplica en una región pequeña de la Tierra, donde no se nota su curvatura. Dado que un arco máximo siempre cruza otro arco máximo, dos geodésicas "paralelas" se unirán necesariamente en dos puntos, una antípoda de la otra. El concepto de paralela como dos rectas que nunca se encuentran, no tiene sentido sobre la superficie de una esfera.

Otros postulados de la geometría euclidiana tampoco se aplican sobre superficies curvas. Por ejemplo, si definimos un triángulo como una figura geométrica formada por tres geodésicas, resulta que tal triángulo no cumple uno de los teoremas básicos de la geometría euclidiana: que la suma de sus tres ángulos internos sea igual a dos ángulos rectos. Para darse cuenta de ello, basta con visualizar el "triángulo" formado por el ecuador y dos cuartos de meridianos sobre

una esfera: la suma de sus ángulos es siempre mayor que 180 grados.

Por supuesto, la superficie de una esfera no es el único ejemplo de una superficie curva. Otros ejemplos son la superficie de un hiperboloide, o la superficie de una silla de montar (figura I.4). Se trata de espacios llamados de curvatura negativa, a diferencia de la superficie de una esfera que es de curvatura positiva. El espacio estudiado originalmente por Lobachevski es de curvatura negativa; en ella dos "rectas" pueden pasar por un mismo punto y ser paralelas a una "recta" dada; además, al contrario de la esfera, en un espacio de curvatura negativa, la suma de los ángulos de un triángulo es menor que 180 grados. También ocurren otras rarezas que contradicen toda la geometría elemental que nos enseñan en la escuela. Empero, como ya dijimos, es un mundo con su propia coherencia.

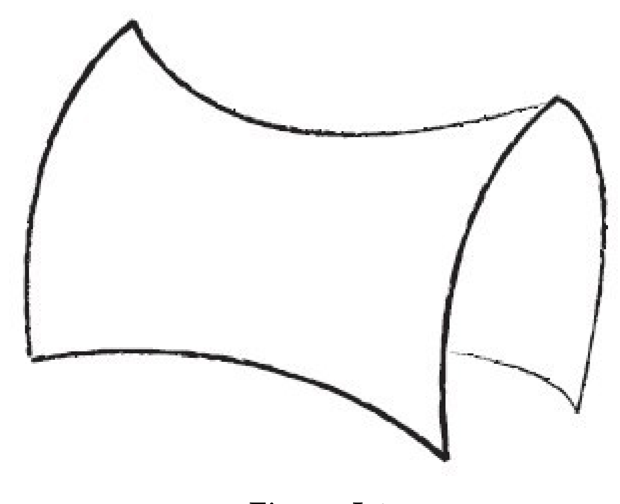


Figura I.4

Espacios riemannianos

Una superficie curva siempre se puede visualizar como un espacio de dos dimensiones inmerso en el espacio de tres dimensiones descrito por la geometría de Euclides. La cur-

vatura, así entendida, no sería algo intrínseco al espacio, sino sólo la consecuencia de restringirse a dos dimensiones dentro de un mundo que, de otra forma, es perfectamente euclidiano. Es esta concepción estrecha la que impidió durante siglos que los matemáticos se percataran de que existen otras geometrías. Se necesitaba del espíritu aventurero de los matemáticos del siglo XIX y, particularmente, de la visión profética de Bernhard Riemann (1826-1866), para que la razón humana pudiese escapar del restringido espacio de las tres dimensiones y buscara una nueva perspectiva del mundo.

Riemann fue el primero en concebir a la curvatura no como una consecuencia de restringir el número de dimensiones, sino como una propiedad intrínseca y muy general del espacio. Esta idea aparece ya en la tesis doctoral que preparó cuando estudiaba en la Universidad de Gotinga, bajo la dirección nada menos que del propio Gauss, donde también tuvo la oportunidad de conocer a muchos de los grandes matemáticos de su época.

En 1854, Riemann preparó una conferencia sobre geometría como parte de su grado de *Habilitationsvortrag*. El trabajo "*Über die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen*" ("Sobre las hipótesis en las que la geometría se fundamenta") habría de convertirse en un clásico de las matemáticas. En él mostró cómo se podía definir un espacio con un número arbitrario de dimensiones y cómo extender el concepto de espacio curvo a dimensiones mayores que dos, generalizando para ello el teorema de Pitágoras a la medición de distancias en múltiples dimensiones. En la segunda parte de su trabajo, Riemann discutió la relación entre física y geometría y se preguntó cuál debía ser la verdadera dimensión del espacio y cuál la geometría que describe el espacio físico. Es cierto que vivimos en un espacio de tres dimensiones, pero el concepto de dimensión es mucho más complejo de lo que parece a primera vista.

En realidad, Riemann estaba demasiado adelantado para su época y sólo Gauss lo entendió. Tendrían que pasar sesenta años para que Einstein volviera al problema y creara la teoría de la relatividad general.

* * *

Una línea o curva es un espacio de una sola dimensión, la superficie de una hoja de papel posee dos dimensiones, y el espacio en el cual nos movemos tiene tres dimensiones. Podemos visualizar fácilmente tales espacios, ¿pero cómo concebir un espacio de más de tres dimensiones?

El concepto matemático no presenta ninguna dificultad. Si un punto en el espacio de tres dimensiones es un conjunto de tres números, entonces todo lo que hay que hacer es definir un punto de un espacio de *n* dimensiones como un conjunto de *n* números. En términos matemáticos, un espacio de *n* dimensiones es simplemente una colección de puntos, siendo cada punto una combinación de *n* números, que son sus coordenadas. Además, lo fundamental es que se puede incluir una definición de distancia en *n* dimensiones simplemente generalizando el teorema de Pitágoras:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + du^2 + dv^2 + dw^2 \ldots$$

que determina la distancia entre dos puntos de un espacio n-dimensional.

Pero la contribución fundamental de Riemann consistió en extender el concepto de curvatura a espacios de múltiples dimensiones, para así definir un *espacio curvo de* n *dimensiones*. Como bien lo notó, tal espacio debe incluir y generalizar una característica importante del espacio de tres dimensiones, que es la posibilidad de definir distancias. Una vez que se fija una fórmula para determinar la "distancia" entre dos "puntos" del espacio de *n* dimensiones, se puede proceder a la exploración de un nuevo mundo matemático que posee una perfecta consistencia. Surgió así una nueva

geometría, la geometría riemanniana, de la cual la geometría euclidiana es sólo un caso particular.

Como mencionamos antes, existe una fórmula para determinar la distancia entre dos puntos sobre cualquier superficie curva a partir de sus coordenadas. La geometría de Riemann no sólo generaliza el teorema de Pitágoras a *n* dimensiones, sino también a espacios curvos. La definición precisa de un espacio riemanniano de *n* dimensiones se da a través de su fórmula para medir distancias, que tiene la forma

$$ds^2 = g_{xx}\,dx^2 + g_{yy}\,dy^2 + g_{zz}dz^2 + g_{uu}du^2 + g_{vv}dv^2 + g_{ww}dw^2 + g_{xy}dxdy + g_{xz}\,dx\,dz + \ldots$$

como generalización de la fórmula anterior. El elemento más importante que aquí aparece es lo que se conoce, en lenguaje técnico, como "tensor métrico", un conjunto de funciones de la forma g_{ij}, con las cuales, a través del teorema de Pitágoras generalizado, se puede medir la longitud de cualquier curva. Más aún, sabiendo medir curvas, se pueden determinar las geodésicas a partir del tensor métrico. Riemann desarrolló el aparato matemático de su geometría en otro trabajo sobre... ¡las propiedades térmicas de los sólidos! Allí aparece el "tensor de Riemann", que indica si un espacio es curvo o no, así como la manera explícita de encontrar geodésicas.

Riemann alguna vez manifestó su esperanza de que los espacios curvos de múltiples dimensiones tuvieran algo que ver con las propiedades físicas del mundo material. Si bien su trabajo no fue debidamente apreciado durante su corta vida, sus ideas empezaron a germinar rápidamente. Así, sólo cinco años después de su muerte, el matemático inglés W. K. Clifford (1845-1879) ya hablaba de que el espacio no sería plano en escalas muy pequeñas, sino que debería poseer algo análogo a "pequeñas colinas"; dicho de otro modo, así como una superficie rugosa se ve lisa desde lejos, de la misma forma el espacio sería plano sólo a gran escala; según sus ideas, la física se podría reducir a los cambios fluctuan-

tes de esa microscópica curvatura. Como veremos en el capítulo VI, estas ideas serían retomadas seis décadas después por Albert Einstein,[4] quien utilizaría la geometría de Riemann para formular su teoría de la gravitación.

[2] Aunque ambos se acusaron mutuamente de plagio, en un amargo pleito.

[3] El lector familiarizado con el cálculo diferencial reconocerá las diferenciales de longitud.

[4] De ningún modo quiero dejar la impresión de que las matemáticas se agotaron con la geometría, y en particular con la riemanniana. Así, por ejemplo, al abandonar el concepto de distancia y concentrarse en las propiedades cualitativas de los espacios, los matemáticos desarrollaron una nueva y extensa rama de las matemáticas: la topología.

II. Tiempo

Fue hallada.
¿Qué? ¡La eternidad!

Rimbaud

Es bien sabido que el tiempo objetivo, el del calendario y el reloj, no siempre coincide con el tiempo subjetivo: en una situación placentera sentimos que el tiempo "vuela", mientras que en circunstancias desagradables el paso de cada segundo se vuelve una tortura.

Para fines prácticos utilizamos un tiempo único y objetivo, que fluye en un solo sentido y nunca regresa. Tanto nos hemos acostumbrado a esta idea que olvidamos cuán distinta era la concepción temporal de nuestros remotos antepasados. Si bien los pueblos antiguos también medían el tiempo, lo hacían con el paso de los días y las estaciones, fenómenos cíclicos que implican un tiempo circular, no lineal.

El tiempo lineal y la Historia son inventos relativamente recientes. Mircea Eliade, el gran historiador de las religiones, mostró cómo, para los pueblos llamados "primitivos", los acontecimientos importantes son repeticiones de hechos sobrenaturales y gestas de dioses, ocurridos en épocas remotas, antes de que empezara a correr el tiempo de los humanos. Los pueblos primitivos sentían un verdadero "terror a la historia" y por ello repetían periódicamente ritos de "abolición del tiempo", con el fin de empezar un nuevo ciclo que sería la representación de un guión ya actuado incontables veces y que representaba lo que los dioses habían hecho una primera vez, cuando crearon el Universo. "Para el hombre tradicional, la imitación de un modelo arquetípico es una actualización nueva del momento mítico en que el arquetipo fue revelado por primera vez."[5]

En el fondo, argumenta Eliade, todos los ritos de renovación son una reescenificación del Arquetipo Primordial: la Creación del Mundo. Trazas de estos ritos se pueden encontrar en las fiestas religiosas, ceremonias de entronización o renovación de gobernantes.

En religiones complejas como la hindú y en algunas variantes del budismo, se mencionan ciclos mucho más largos, de miles de años, al término de los cuales el mundo habría de acabar catastróficamente para luego nacer de sus cenizas. Para los filósofos estoicos de la antigua Grecia, el mundo habría de consumirse en un fuego cósmico, la "ecpirosis", para luego renovarse una vez más.

Eliade señala que los acontecimientos históricos empiezan a aparecer sólo en las religiones modernas. En la Biblia, Dios se manifiesta en momentos precisos de la historia: el tiempo de las revelaciones es también el tiempo de los humanos. El pleno concepto de un tiempo lineal, en el que ocurren progresos, se remonta apenas al siglo XVII, cuando Newton descubre las leyes que gobiernan el movimiento de la materia. Hasta esa época, se tendía a suponer que la verdadera sabiduría había sido el patrimonio de la Antigüedad, y que cualquier cambio apuntaba hacia una degeneración del mundo y un empeoramiento de la condición humana; ante lo cual era preferible pensar que la historia se repite cíclicamente o aceptar que el fin del mundo estaba relativamente cerca. La Historia y el Progreso son conceptos modernos.

Platón

Platón describe la creación del Universo y el nacimiento del Tiempo en el diálogo de *Timeo*. Si bien se trata de una hermosa narración, no está claro qué tanta veracidad le asignó y qué tanto de ella pretendió que se tomara en forma simbólica, lo cual, además, puede depender del periodo en el que lo escribió. Sobra decir que su narración no corresponde a los estándares modernos de investigación científica.

Cuenta Platón, por boca de Timeo, que el Demiurgo hizo primero un modelo del Universo que era una Criatura Viviente eterna. Cuando estuvo satisfecho de su obra, proce-

dió a hacer el Universo mismo de acuerdo a ese modelo. Pero la copia no podía ser perfecta porque no era eterna y, por lo tanto, el Demiurgo hizo el Tiempo como una "imagen móvil de la Eternidad", que "se mueve de acuerdo con los números (37 d)".[6]

El tiempo, pues, es algo conmensurable que acompaña al mundo material y que no existía antes de él. Al respecto, el texto dice a la letra:

> El Tiempo fue creado junto con los Cielos, con el fin de que, habiendo sido generados juntos, puedan disolverse también juntos… y fue hecho de acuerdo con el plan de la Naturaleza Eterna con el fin de que le fuera tan parecido como posible. En efecto, el modelo es algo que existe de toda eternidad, mientras que el cielo… "fue", "es" y "será"… De donde el Demiurgo… para generar el Tiempo, creó el Sol, la Luna y cinco otras estrellas, que se llaman "planetas" (errantes) para determinar y preservar los números del Tiempo. (38 b-c)

El texto anterior se puede entender en el contexto de la teoría platónica de las Formas o Ideas. Abramos aquí un paréntesis más bien amplio para explicar esta concepción platónica, ya que volveremos a ella más adelante, en el contexto de la física moderna.

Uno de los problemas que interesaban a Platón era el de la percepción de la realidad. Si el mundo, para nosotros, es una sucesión de sensaciones, ¿cómo puede nuestra mente percibir algo coherente? Heráclito decía que nadie se mete dos veces al mismo río, pues las aguas del río cambian continuamente; y, sin embargo, podemos concebir un río. La respuesta de Platón es que nuestras concepciones no se aplican a la experiencia sensorial, siempre mutable, sino a otro registro de la realidad, un mundo de las Ideas, Formas o Imágenes (las dos palabras originales que utiliza indistintamente son: idea y eidos, que se traducen según el gusto de cada traductor), entes inmutables que nos permiten darle un sentido a la realidad. Sin las Formas, el mundo sensible sería para nosotros sólo un conjunto abigarrado de sensaciones.

De acuerdo con Platón, el mundo de las Formas debe ser eterno y ajeno al tiempo, y el mundo material es su copia paralela. Esta concepción puede parecer extraña y esotérica, pero podemos ilustrarla con un ejemplo familiar de lo que podría ser una región de ese mundo: las matemáticas.

Círculos, cuadrados, triángulos son conceptos puros y abstractos, ya que en el mundo real sólo existen objetos que son más o menos circulares, cuadrados o triangulares. Pero el conocimiento de las figuras geométricas nos permite percibir algo como redondo, etc. ¿Dónde están esas Formas geométricas? Platón era renuente a poner sus ideas demasiado explícitamente por escrito, ya que confiaba en transmitir sus conocimientos al futuro escribiendo en las almas, más que en los pergaminos. Nos queda el testimonio de su discípulo Aristóteles quien, en su *Metafísica,* cuenta que su maestro situaba a las matemáticas en una posición intermedia entre el mundo de la Formas y el de la materia sensible. Así, nuestra mente "construye la experiencia" conectando las Formas con la realidad sensible por medio de una estructura simbólica, como lo es el lenguaje matemático. Eso es lo que dice Aristóteles que le oyó decir a su maestro.[7]

Si las matemáticas forman un mundo aparte, ¿qué tan real es ese mundo? Esto conduce a la pregunta fundamental: ¿existen las matemáticas independientemente de la mente humana? Preguntas más específicas relacionadas con esta misma son: ¿existen las verdades matemáticas si nadie las demuestra?, ¿existía el teorema de Pitágoras antes de que hubiera seres humanos que lo concibieran?, ¿existen los números primos, que son infinitos y que, por lo tanto, no podemos conocerlos todos?, ¿a qué clase de realidad se refieren las conjeturas matemáticas, como la de Goldbach[8] o la de Riemann,[9] que no han sido demostradas todavía?

Al respecto, hay diversas escuelas de pensamiento. Para los formalistas, las matemáticas son sólo un lenguaje, un conjunto de símbolos que no tienen más sentido que el que nosotros les damos por convención; así, la demostración de conjeturas como las de Goldbach o la de Riemann, si llegaran a encontrarse, sería un conjunto de símbolos con algún sentido para los matemáticos y nada más. Para los intuicionistas, las matemáticas consisten en construcciones intuitivas basadas en los números naturales, que son los únicos

que tienen realidad; lo demás, teoremas o conjeturas, serían puras construcciones de la mente humana.

La posición contraria a las anteriores es la del platonismo matemático. Como mencionamos, el mundo material, según Platón, es el reflejo de otro mundo, el de las Formas. Existen figuras geométricas como círculos o triángulos perfectos, cuyas "sombras" o copias percibimos en el mundo material en forma de objetos más o menos circulares o triangulares. Asimismo, existen infinitos números que poseen propiedades reales, unas desconocidas y otras conocidas —como son las conjeturas—, que no dependen de si algún matemático las descubre. Las matemáticas son una porción del mundo inmutable de las Formas, la más cercana a la materia, y las verdades matemáticas existen al igual que un territorio que puede permanecer inexplorado sin que por ello deje de tener una existencia real.

En resumen, se puede decir que las matemáticas existen fuera del espacio y el tiempo: cualquier verdad matemática es válida eternamente e independientemente de la situación espacial; los teoremas se cumplen en cualquier lugar del Universo y en cualquier momento. A diferencia de las cosas materiales, que son efímeras y se alteran con el paso del tiempo, las matemáticas son inmutables. Si aceptamos que forman un mundo independiente, debemos aceptar también que se trata de un mundo en el que el tiempo no transcurre.

Si aceptamos, además de las matemáticas, la existencia de un mundo inmaterial más amplio, el de las Formas, que se sitúa fuera del tiempo, podemos entender mejor la cosmogonía esbozada en el Timeo. El Universo material existe como la imagen de una Forma, la Idea del Universo, la "Criatura Viva" que según Platón es eterna, al igual que las matemáticas. El Universo material, tal como lo percibimos, existe gracias a que el tiempo transcurre en él, pero el tiempo es una propiedad de la materia, no de las Formas.

¿Cómo definir el tiempo? Platón no encuentra mejor definición que en términos del movimiento de los cuerpos ce-

lestes. El Sol, la Luna y las estrellas generan la noche y el día, así como los meses y los años. Identifica, así, los números del tiempo, es decir su medición, con el movimiento planetario, que era la única manera confiable de medirlo en su época. Veremos en el capítulo IX que la situación no cambió drásticamente durante muchos siglos y que sólo recientemente sustituyeron los átomos a los cuerpos celestes como medidas del tiempo.

Aristóteles

Aristóteles, en su *Física*, intenta también elucidar el concepto del tiempo. Después de enumerar lo que no es, no le queda más remedio que definir al tiempo como aquello que se puede medir con números. El tiempo es una medida del movimiento, pero no es el movimiento. El tiempo es "el número del movimiento, de acuerdo con lo anterior y lo posterior" ("*arithmos kineseos kata to proteron kai usteron*"). En esto no añade nada nuevo a lo dicho por Platón, para quien el tiempo era, en esencia, lo que se medía con el movimiento de los astros, pero critica la afirmación de su maestro, expuesta en el *Timeo*, de que el tiempo fue engendrado junto con el mundo. La contradicción es demasiado obvia para que Aristóteles la haya dejado pasar; para él es evidente que el tiempo debe ser infinito, pues no tiene sentido hablar del principio del tiempo, cuando todo principio tiene que ocurrir en el tiempo mismo.

San Agustín

"¿Qué es el tiempo?" se pregunta San Agustín al igual que tantos otros mortales. En el Libro XI de sus *Confesiones* plantea de diversas formas esta interrogante fundamental y termina por reconocer: "Si nadie me pregunta; lo sé; si al-

guien me pregunta y lo quiero explicar, no lo sé." No obstante, sigue analizando el problema; nota que, como es evidente, hay tres tiempos: futuro, presente y pasado; el presente es sólo un paso entre el futuro y el pasado, mientras que el futuro se vuelve pasado continuamente. Actuamos en forma tal que anticipamos el futuro y recordamos las cosas que ocurrieron y pasan a formar parte del pasado; futuro y pasado son reales, tan reales como el presente que percibimos.

Pero, ¿dónde están el pasado y el futuro? Si sólo percibimos el presente, entonces es incorrecto decir que existen tres tiempos. Sólo hay un presente que se manifiesta en tres formas distintas: un presente que trata del pasado y que es un recuerdo; un presente que trata del presente y que es una visión fugaz; un presente que trata del futuro y que es una espera. "Tres tiempos que veo... tres realidades."

Luego se pregunta San Agustín cómo medimos el tiempo. Su respuesta es la misma que dio Platón: en la práctica, con respecto al movimiento de los astros que sirven para marcar días y años. Así era en su época (y sigue siendo en parte hasta ahora). Pero, ¿cómo medir, por ejemplo, la duración de un sonido? ¿Cómo determinar que un sonido es más largo que otro? "No lo puedo hacer más que si ya pasaron y terminaron. Entonces no son ellos los que mido; ya no son nada; sino que es algo que queda grabado en mi memoria."

"*Es en ti, alma mía, que mido los tiempos...* La impresión que, cuando pasan, las cosas hacen en ti y que, cuando pasaron, permanece, es ella la que mido, y no las cosas, que pasaron cuando mido el tiempo."[10] El tiempo, entonces, sería una propiedad de la mente que nos permite percibir el mundo. Esta concepción sería elaborada más profundamente por Kant, como veremos en el capítulo V.

En cuanto a si Dios existía antes de crear al mundo, San Agustín llega a la conclusión de que el tiempo es una creación divina, junto con el mundo. Por lo tanto, Dios existe fuera del tiempo: para Él no hay pasado y futuro, sino un

único presente. Una vez más nos encontramos con la idea platónica del tiempo.

Espacio y tiempo newtonianos

El concepto de un tiempo objetivo se remonta al siglo XVII, cuando Newton publica su obra magna, los *Principios matemáticos de la filosofía natural*, en la que establece las leyes que gobiernan el movimiento de los cuerpos materiales. Newton postuló la existencia de un Tiempo Absoluto: "un tiempo matemático que fluye uniformemente sin relación con nada externo". Ese tiempo es un parámetro en las ecuaciones de movimiento con el cual se miden todos los intervalos de tiempo. Es un tiempo del todo objetivo.

En el primer capítulo de los *Principia*, después de definir algunos conceptos de física, Newton incluye un escolio en el que intenta definir conceptos que deberían ser familiares por ser de uso común: *tiempo, espacio y movimiento*. Sin embargo, hace notar que,[11]

> no habiendo considerado estas cantidades más que por sus relaciones con cosas sensibles, se ha caído en varios errores. Para evitarlos, hay que distinguir el tiempo, el espacio, el lugar, y el movimiento entre absolutos y relativos, verdaderos y aparentes, matemáticos y vulgares.

I. El tiempo absoluto, verdadero y matemático, sin relación a nada exterior, fluye uniformemente, y se llama duración. El tiempo relativo, aparente y vulgar, es esa medida sensible y externa de una parte de duración cualquiera (igual o desigual) tomada del movimiento: tales son las medidas de horas, días, meses, etc., de las cuales se hace uso común en lugar del tiempo verdadero.

II. El espacio absoluto, sin relación con las cosas externas, permanece siempre similar e inmóvil. El espacio relativo es esa medida o dimensión móvil del espacio absoluto, la cual cae bajo nuestros sen-

> tidos por su relación con los cuerpos, y que el vulgo confunde con el espacio inmóvil.

Unos párrafos más adelante, Newton deja claro qué tiene en mente con el Espacio Absoluto. Se trata de retomar la relatividad de Galileo y mostrar que el movimiento medido comúnmente es siempre con relación a algún cuerpo como la Tierra misma, independientemente de cómo se mueva en el espacio. Sin embargo, quiere mostrar que tal relatividad tiene sus limitaciones cuando se trata de movimientos que no son uniformes y en línea recta. En efecto, ¿es lo mismo decir que la Tierra gira alrededor de su eje y las estrellas están fijas, que al revés: las estrellas giran alrededor de la Tierra inmóvil? Newton hace la distinción clara entre las dos interpretaciones, para lo cual propone el famoso experimento de la cubeta que gira suspendida de una cuerda retorcida; el agua en el recipiente resiente una fuerza centrífuga que curva su superficie; he ahí una clara distinción entre dos sistemas de referencia que no son equivalentes: un observador fijo con respecto a la cubeta no puede pretender que el Universo gira a su alrededor. De ahí concluye que existe un Espacio Absoluto con respecto al cual se debería medir todo movimiento, pero reconoce que tal medición sería extremadamente difícil en la práctica. Años después, en su segunda gran obra, la *Óptica*, Newton todavía no había encontrado una definición convincente y llegó a comparar el espacio cósmico con el sensorio de Dios.[12]

En cuanto al Tiempo Absoluto, Newton equipara éste con el tiempo astronómico. Intenta una explicación científica: una vez más recurre al movimiento de los astros, pero con la aclaración de que ese movimiento, por medio de relaciones matemáticas, debe relacionarse con el Tiempo Absoluto. Reconoce, empero, que el problema no es simple

> ya que los días naturales son desiguales, a pesar de que se les suele tomar como una medida igual de tiempo; y los astrónomos corrigen esta desigualdad, con el fin de medir los movimientos celestes con un tiempo más preciso.
>
> Es muy posible que no haya ningún movimiento perfectamente igual, que pueda servir de me-

dida exacta del tiempo; ya que todos los movimientos pueden ser acelerados o retardados, pero el tiempo absoluto debe fluir siempre de la misma manera.

Newton está consciente de que el tiempo, en la práctica, se mide por medio de instrumentos que pueden ser más o menos precisos, pero tiene que utilizar un tiempo único que no es más que un parámetro en las ecuaciones de movimiento de los cuerpos. El problema de definir el tiempo objetivo con precisión era bien conocido de los astrónomos de su época. Los días terrestres son desiguales debido, principalmente, a la forma elíptica de la órbita terrestre y la inclinación de su eje de rotación; para corregir todas las variaciones, los astrónomos inventaron un tiempo idealizado que corresponde al movimiento uniforme de un sol imaginario a lo largo del ecuador celeste, y relacionaron ese tiempo ideal con el terrestre por medio de una llamada "ecuación del tiempo". Eso es a lo que Newton se refiere en el pasaje que mencionamos, pero hay que tomar en cuenta que su tiempo absoluto, por muy astronómico que sea, es, para todo fin práctico, un tiempo matemático; sólo matemáticamente se puede determinar. Pero él mismo reconoce que no es evidente que tal tiempo absoluto se pueda medir en forma práctica.

Conociendo las inclinaciones teológicas de Newton, cabe especular si lo que tenía en mente, al hablar de un tiempo relativo, era un tiempo medido por seres imperfectos, como somos los humanos, mientras que el Tiempo Absoluto sería el tiempo de Dios. Después de todo, si llegó a comparar el espacio con el sensorio de Dios, también podría concebir que Dios tiene su propio tiempo —algo así como el "Tiempo Oficial" del Universo— con respecto al cual se sincronizan los relojes individuales. ¡Por algo Dios es también el Gran Relojero! En cambio, la materia andaría revoloteando por el Universo con una multiplicidad de tiempos propios de cada reloj, con todas las imperfecciones que causan los atrasos y adelantos comunes.

De todos modos, Newton no se preocupa en los *Principia* de cómo medir ese Tiempo Absoluto. De hecho, ni siquiera

lo vuelve a mencionar en su texto porque no tiene ninguna necesidad de recurrir a ese concepto. En la física, desde entonces, el tiempo es, para todo fin práctico, sólo un parámetro que aparece en las ecuaciones de movimiento, una variable matemática que se puede medir con algún proceso natural cíclico, como la rotación de la Tierra o las vibraciones de una molécula.

Ése es el único sentido práctico que se le puede dar al tiempo newtoniano. De allí lo justificadas de las críticas de los positivistas como Ernst Mach, para quien el Tiempo Absoluto era un "concepto metafísico ocioso". En efecto, ¿qué sentido tiene introducir un concepto supuestamente físico que, por principio, es imposible de medir? Si el Tiempo Absoluto no es accesible a los humanos, no tiene lugar en la ciencia. Para los positivistas, era necesario desembarazar a la ciencia de todos los conceptos inaccesibles por principio a la observación, y sus primeras víctimas fueron el Espacio y el Tiempo absolutos de Newton.

A pesar de que el positivismo cayó gradualmente en desuso a lo largo del siglo XX, hay que reconocer que, en su momento, sus críticas fueron provechosas para el desarrollo de la nueva física. Como veremos en el capítulo VI, Einstein supo retomar algunas de ellas para desarrollar su teoría de la relatividad.

[5] Véase Mircea Eliade, *El mito del eterno retorno,* Alianza Editorial, Madrid, 1972.

[6] Hay que reconocer que el texto original es ambiguo y los expertos no se han puesto de acuerdo en cómo interpretarlo. En otras traducciones, la imagen móvil de la Eternidad es el Universo mismo.

[7] Aristóteles, *Metafísica*, libro I, cap. 6.

[8] La conjetura de Goldbach es que todo número par se puede escribir como la suma de dos números primos. Conocida desde la época de Euler, no se ha podido demostrar hasta la fecha, a pesar de que se ha comprobado por medio de computadoras para los primeros 400 billones de billones de números pares.

[9] La conjetura de Riemann tiene que ver con los ceros de la llamada función de Riemann en el plano complejo, los cuales están relacionados, a su vez, con los números primos.

[10] El énfasis es mío.

[11] Sigo literalmente la traducción al francés de los *Principia* realizada por la Marquesa de Châtelet en el siglo XVIII, que tiene la gran ventaja de haber sido escrita sólo unas décadas después del original, en un idioma directamente emparentado con el latín y, por ende, con nuestro español. Aunque no totalmente fiel al original, la traducción de la inmortal Émilie es probablemente la más clara y comprensible de todas.

[12] *Optiks*, query 31.

III. Movimiento y acción a distancia

Doctores en física:
no se vayan a equivocar, ;
lo del movimiento es un invento
para ver a mi morena bailar…

Tomasito y Antonio de los Ríos
“Mi morena” flamenco)

Según una creencia popular bastante difundida, la ciencia avanza aclarando uno tras otro los misterios de la naturaleza. Lo que alguna vez fue un misterio se resuelve gracias a nuevos descubrimientos, después de lo cual viene una siguiente etapa en la que aparecen nuevos misterios por resolver, y así sucesivamente. Sin embargo, lo que sucede en la realidad no es tan simple: Thomas Kuhn[13] señaló hace tiempo que el progreso de la ciencia no se da en forma gradual sino por saltos, pasando de un sistema científico (paradigma) a otro por medio de revoluciones científicas que cambian bruscamente la visión del mundo. Aun así, los problemas fundamentales del sistema viejo que se habían quedado sin solución no siempre se aclaran; más bien, se vuelven irrelevantes. Paul Feyerabend[14] notó que tales problemas no se *resuelven*, sino que se *disuelven* en el nuevo sistema. Un ejemplo de ello es el problema de la gravitación y su aparente acción a distancia, que tanto preocupó a los filósofos de la época newtoniana, sin que llegara a ser resuelto en una forma aceptable para ellos. Se trata de un problema que fue disuelto en las modernas teorías físicas. Lo analizaremos en el presente capítulo.

Dos mundos

Aristóteles, y con él los filósofos antiguos, pensaban que había dos mundos, el terrestre y el celeste, cada uno con características muy distintas. El mundo terrestre, en el que se aplican las leyes conocidas de la naturaleza, se extendía hasta la esfera lunar, sobre la cual está colocada la Luna. La ma-

teria, dentro de esa esfera, estaría hecha de los cuatro elementos que los mortales conocemos: agua, aire, tierra y fuego; más allá de ella, los planetas y astros obedecerían otras leyes, inaccesibles a la experiencia humana; allí no habría materia como la que conocemos sino otra sustancia, el quinto elemento o "quintaesencia", de la que estarían hechos los astros. De acuerdo con esta visión del mundo, el movimiento de los cuerpos en la Tierra y el movimiento de los astros en los cielos serían de una naturaleza esencialmente diferente.

La gravedad, por ser un fenómeno terrestre, debía ser propia del mundo sublunar. Aristóteles, en su afán de explicar todo, afirmó que los cuerpos masivos bajan y el fuego sube porque ése es el "movimiento natural" propio de ellos. Lo cual es sólo otra manera de decir que los cuerpos caen y el fuego sube porque así debe ser.

En cuanto al movimiento de los planetas, Aristóteles se conformó con aceptar el modelo de Eudoxo que constaba de nada menos que 52 esferas girando unas sobre otras, con lo cual se reproducía el movimiento aparente de los planetas sobre la bóveda terrestre. Se trataba de un modelo mecánico para explicar el movimiento de los astros, sin buscar el motivo que impulsaba a esas esferas a girar en la forma en que lo hacían. Pero, después de todo, tal móvil debía pertenecer a ese otro mundo, el celeste, cuyas leyes son incomprensibles para los humanos. Bastaba con aceptar que los planetas se mueven en círculo porque, de todos los movimientos, el circular es el más perfecto por ser totalmente uniforme.

El gran astrónomo de la Antigüedad, Ptolomeo, desarrolló un complicado sistema que permitía describir y predecir el movimiento de los planetas con una mejor precisión. Su sistema situaba a la Tierra en el centro del Universo y el Sol giraba alrededor de él; los planetas se movían sobre epiciclos: círculos montados sobre otros círculos, todo lo cual iba de acuerdo con la perfección del movimiento circular. Durante varios siglos, los astrónomos utilizaron el modelo de

Ptolomeo para predecir el movimiento de los planetas, lo cual requería, por supuesto, de pesados cálculos. Sin embargo, Ptolomeo no pudo explicar por qué se mueven los planetas sobre epiciclos; tal problema rebasaba las posibilidades del conocimiento en su época.

Como es bien sabido, Copérnico tuvo la idea de colocar al Sol en el centro del Universo y a los planetas girando alrededor de él. Sin embargo, el modelo heliocéntrico de Copérnico tampoco explicaba por qué se mueven los planetas en la forma en la que lo hacen. El modelo tenía el enorme mérito, puesto en una perspectiva actual, de colocar al Sol en el centro del Sistema Solar, pero hay que reconocer que, para fines prácticos, no era mejor que el modelo de Ptolomeo para predecir la posición de los planetas. Copérnico recurrió una vez más a los engorrosos epiciclos, pues no se había librado de la perfección del movimiento circular; incluso tuvo que colocar al Sol ligeramente desplazado del centro del Universo para poder explicar con mejor precisión el movimiento de los planetas. En buena parte, si el modelo heliocéntrico de Copérnico no fue aceptado fácilmente fue porque no era más sencillo que el de Ptolomeo; éste, por lo menos, tenía la ventaja de ser conocido por los astrónomos desde hacía siglos.

El sistema de Copérnico encontró un defensor entusiasta en Galileo Galilei. Muy convenientemente, Galileo nunca tomó en cuenta los detalles engorrosos del modelo de Copérnico y se conformó con su esencia: el Sol es el centro alrededor del cual giran los planetas. Supuso, para simplificar, que las órbitas planetarias son círculos centrados en el Sol y pasó por alto las pequeñas desviaciones con respecto a tan perfecto movimiento. Tuvo mucha razón en no dar importancia a detalles que habrían de corregirse una generación después.

Galileo mismo nunca buscó una explicación física del movimiento de los planetas. A pesar de que estudió minuciosamente el movimiento de los cuerpos que caen en la

Tierra, no se le ocurrió que la fuerza de gravedad pudiera tener una relación con el movimiento de los astros. Quizás, inconscientemente, no se había desprendido del viejo prejuicio aristotélico de que los fenómenos celestes son de naturaleza distinta de los terrestres.

Otro importante defensor de Copérnico fue Kepler, cuyas observaciones minuciosas del movimiento de los planetas le permitieron descubrir las famosas tres leyes que llevan su nombre. Con ellas los filósofos pudieron, por fin, desembarazarse de la supuesta perfección del movimiento circular, para así llegar a la gran síntesis matemática de Newton.

A Descartes, contemporáneo de Galileo y Kepler, se le debe uno de los primeros intentos de explicar el movimiento de los planetas con base en fenómenos físicos. Según él, el espacio cósmico estaría repleto de una sustancia invisible y muy sutil: el Éter, un fluido "más puro que el aire" cuyo movimiento en forma de torbellinos alrededor del Sol arrastraría a los planetas. La teoría de los torbellinos de Descartes llegó a ser bastante aceptada en su época; la idea tenía el atractivo de corresponder a una imagen que es común encontrar en nuestra experiencia mundana, ya que todos hemos visto cómo un remolino de agua arrastra las hojas que flotan en su superficie. Pero, finalmente, era una forma de relegar un problema a otro más básico, pues ¿cuál era el origen de ese Éter y por qué habría de girar para arrastrar consigo a los planetas?

Acción a distancia

Que el Sol tenga alguna influencia mecánica sobre el movimiento de los planetas es tan poco evidente que ni Copérnico, ni Galileo se percataron de algo así. Por esas épocas se pensaba que un cuerpo no puede influir sobre otro a través del espacio vacío; sólo por medio de algún cuerpo material. Sin embargo, el magnetismo era un excelente ejemplo de

una interacción entre cuerpos sin que mediara nada palpable.

El primer estudio profundo del magnetismo se debe a William Gilbert, filósofo natural y médico personal de la reina Elizabeth I de Inglaterra. Gilbert publicó, en 1600, *De magnete*, obra dedicada a esa extraña piedra que tiene la propiedad de atraer el hierro sin nada intermedio. Escrito originalmente en latín, empieza, como todos los tratados de su época, con una enumeración detallada de los textos antiguos en los que se citan los imanes: el nombre mismo, explica Gilbert, proviene de la ciudad griega de Magnesia, donde abundaban las piedras imantadas, aunque no está claro si se trata de una ciudad en Macedonia u otra homónima en Ionia. En los siguientes capítulos, el autor describe diversos experimentos que realizó para comprobar que la Tierra es un gigantesco imán, lo cual explica por qué una aguja imantada siempre apunta hacia el norte. Asimismo, describe detalladamente el fenómeno de la magnetización inducida, que consiste en que un pedazo de hierro en contacto con un imán adquiere sus mismas propiedades. Es notable que *De magnete* también abarca la atracción eléctrica; en esas épocas, este fenómeno se producía frotando ámbar con un trapo y el nombre mismo proviene de la palabra griega para ámbar: *elektron*. En los últimos capítulos, Gilbert pasa a la astronomía y defiende el sistema heliocéntrico de Copérnico; declara que la Tierra gira sobre sí misma y también alrededor del Sol, e infiere que las estrellas se encuentran a grandes y variadas distancias.

La teoría del magnetismo influyó sobre Kepler y probablemente también sobre Newton. Kepler trató de explicar el movimiento de los planetas por algún medio físico; su teoría, por desgracia, estaba plagada de errores, pero llegó a tener bastante aceptación en su época y es un buen punto de referencia para apreciar en su contexto la contribución posterior de Newton. En primer lugar, Kepler descubrió por medio de observaciones muy precisas que la velocidad de

un planeta en el afelio y el perihelio varía en relación inversa con la distancia al Sol (hoy en día sabemos que eso es cierto y se debe a la conservación del momento angular), pero de ahí dedujo erróneamente que la velocidad en general satisface la misma relación.[15] El siguiente paso en su razonamiento deductivo fue utilizar el concepto aristotélico de que se debe aplicar una fuerza constante para mantener una *velocidad* constante (lo cual, como sabemos ahora, sólo se aplica cuando no hay fricción). Siguiendo con el razonamiento, Kepler dedujo que debería haber en el espacio una fuerza motriz cuya intensidad *varía en relación inversa a la distancia al Sol* (nótese otro error fundamental: el momento angular es constante a lo largo de la trayectoria de un planeta, pero cada planeta tiene un momento angular distinto).

Así, Kepler dedujo la existencia de una fuerza centrada en el Sol que mueve a los planetas y depende de la distancia a ese astro; debería ser, por lo tanto, una fuerza emanada de ese astro. Por esa época, el tratado de Gilbert ya era conocido y se sabía que existe en la naturaleza al menos una fuerza adicional a la gravedad terrestre. Así que a Kepler le resultó fácil concluir que el Sol producía una fuerza magnética… o "casi-magnética", pero nunca precisó qué entendía por eso.

La gravitación universal

Antes de Newton, el intento más realista de explicar el movimiento planetario se debe a Robert Hooke. Este científico inglés, sin duda el físico experimental más importante de su siglo, curador de la Royal Society, hizo numerosas contribuciones a la ciencia, pero la historia ha sido injusta con él: su mayor desgracia fue ser contemporáneo de Newton y ver su fama eclipsada por la de su poderoso rival.

Hooke publicó en 1674, doce años antes de la aparición de los Principia, un libro intitulado *An Attempt to Prove the*

Motion of the Earth by Observations en el que, por primera vez, aparece planteado correctamente el problema del movimiento planetario. Sus suposiciones eran:[16]

> Primero, que todos los cuerpos celestiales sin excepción, poseen una atracción o poder gravitatorio hacia sus propios centros, con lo cual atraen no sólo sus propias partes, y evitan que se dispersen, como podemos observar que hace la Tierra, sino que también atraen todos los otros cuerpos celestiales que están dentro de la esfera de sus actividades… La segunda suposición es la siguiente. Que cualquier cuerpo puesto en movimiento directo y simple continuará moviéndose en línea recta, hasta que por otro poder efectivo sea desviado y curvado en su movimiento, describiendo un círculo, una elipse, o alguna otra línea curva compuesta. La tercera suposición es que esta potencia atractiva opera con más poder, en tanto el cuerpo sobre el cual actúa se encuentra más cerca de su centro. Ahora bien, cuáles son estos diversos grados, aún no lo he verificado…

Nótese cómo Hooke intuye correctamente el fenómeno gravitatorio, además de adelantarse a la primera ley de Newton, pero su descripción de la fuerza de atracción no pasa de ser cualitativa. Con todo lo que tiene de visionario su planteamiento, Hooke nunca pudo profundizar más en el tema. De ahí a un sistema matemáticamente bien fundamentado, cuantitativo y riguroso, hay un larguísimo trecho que sólo Newton, en esa época, pudo recorrer.

A Isaac Newton se le atribuye el descubrimiento de la gravitación universal, es decir, el hecho de que todos los cuerpos en el Universo se atraen entre sí por medio de una fuerza de gravitación. Antes que él, con excepción de Hooke, a nadie se le había ocurrido que pudiera haber una relación entre la caída de los cuerpos en la Tierra y el movimiento de los astros en el cielo. Al contrario, como ya mencionamos, se pensaba que las leyes de la naturaleza son distintas para los cuerpos en el cielo y en la Tierra.

Según una famosa leyenda, estaba un día el joven Newton sentado debajo de un manzano, meditando sobre la razón que mantiene a la Luna en órbita alrededor de la Tierra y a los planetas alrededor del Sol, cuando vio caer una manzana. Este incidente le habría dado la clave para entender que tal fuerza es la gravedad, una fuerza propia de todos los cuerpos en el Universo y no restringida a la Tierra. Esencialmente, su razonamiento habría consistido en comparar la fuerza centrífuga de la Luna en su órbita (por medio de una fórmula que él mismo había deducido) con la fuerza de

gravedad en la superficie terrestre y comprobar que la razón entre las dos fuerzas es la misma que la razón al cuadrado entre el radio de la Tierra y la órbita lunar.

Es probable que se trate de una leyenda inventada por el mismo Newton en su vejez. El descubrimiento real está relacionado necesariamente, por una parte, con la tercera ley de Kepler —que relaciona el cuadrado del periodo de un planeta con el cubo de su radio— y, por otra, con la fórmula para la aceleración centrífuga —proporcional al cuadrado de la velocidad dividida por el radio de la órbita— que Newton había descubierto independientemente. El razonamiento que hay que seguir consiste, primero, en postular que existe una fuerza de atracción hacia el Sol que se compensa exactamente con la fuerza centrífuga que actúa sobre un planeta debido a su movimiento orbital. De esa forma, resulta que la fuerza de atracción del Sol debe disminuir como el cuadrado del radio orbital. Sin embargo, de ahí no se deduce necesariamente cuál debe ser la naturaleza de la fuerza con la cual el Sol atrae a los planetas. Hacía falta el genio de Newton para darse cuenta de que se trata de la fuerza de gravedad, la misma que atrae las manzanas, y desarrollar un poderosísimo método matemático que le permitió describir con precisión el movimiento de los planetas.

Newton formuló la ley de la gravitación universal y demostró con todo rigor matemático que las tres leyes de Kepler son una consecuencia de ella. Esta ley estipula que la fuerza gravitatoria entre dos cuerpos masivos es directamente proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Newton publicó el resultado de sus trabajos en su famoso libro *Principia,* en 1686. Con esta obra nació la física como una ciencia matemática. En palabras de Alexandre Koyré:[17]

La pregunta: *A quo moveantur planetae*?… se unió al problema famoso: *A quo moveantur proyecta*?… Y se puede decir que la ciencia moderna, unión de la física celeste y la física terrestre, nació el día en que la misma respuesta se pudo dar a esta doble pregunta.

¿Acción mecánica?

A pesar de su éxito extraordinario, no todos los contemporáneos de Newton se dejaron impresionar por la nueva ciencia de la mecánica. Para algunos filósofos, el sistema newtoniano era una manera muy ingeniosa de describir las trayectorias de los planetas, pero no revelaba la esencia misma de la gravitación. El problema persistía: ¿cómo pueden dos cuerpos materiales atraerse mutuamente a través del espacio vacío, sin la mediación de alguna otra sustancia? La pregunta fundamental seguía sin respuesta: *¿por qué* se mueven los planetas?; Newton sólo había demostrado *cómo* se mueven.

Todo mundo sabe, por experiencia propia, que para mover un objeto es necesario hacer contacto con él, directamente con las manos o con otro cuerpo que lo jale o lo empuje: una cuerda, el viento, etcétera. Cualquier otro movimiento sería magia o brujería… Sin embargo, la fuerza de la gravedad, a pesar de ser tan familiar, no encaja en ese esquema y parece ser de una naturaleza del todo distinta. Los cuerpos caen, pero no hay nada visible o palpable que los empuje hacia el suelo.

Este problema no pasó desapercibido ni a Newton ni a sus contemporáneos. Sus principales críticos, como Huygens y Leibniz, sin dejar de reconocer los méritos de la síntesis teórica lograda por su colega, insistieron en que la causa de la gravitación estaba lejos de haber sido elucidada, pues una cosa era la descripción con fórmulas matemáticas del fenómeno de la gravitación, y otra su explicación a partir de conceptos conocidos. Para ellos, el principio de la atracción a través del espacio vacío era simplemente absurdo; el espacio debía estar lleno de *algo* que produjera la interacción entre cuerpos distantes; ese algo, evidentemente, debía ser una sustancia casi invisible e impalpable, pero real; en espera de elucidar su naturaleza, no quedaba más que recurrir al concepto del misterioso Éter.

Huygens, con el afán de encontrar una explicación mecánica de la atracción gravitatoria, elaboró un modelo basado en torbellinos. En una visita a Londres que efectuó en 1668, presentó un ingenioso experimento. Hacía girar un cilindro lleno de agua en el cual flotaban pedazos de cera; al detener bruscamente la rotación, éstos se dirigían al centro del cilindro; algo semejante, según Huygens, debía ser la causa de la gravedad.[18]

Leibniz, por su parte, no dejó pasar la oportunidad de criticar a su colega y rival inglés y se manifestó decepcionado de que Newton no hubiese llegado a la causa final de la gravedad, que a su juicio debía interpretarse también por medio de remolinos en un Éter cósmico (¡una vez más!), que arrastra a los planetas en un "movimiento armónico",[19] de acuerdo con su concepto de la armonía preestablecida.

En su defensa, Newton enfatizó que él no conocía la razón última de la atracción gravitacional y que sólo había descubierto su descripción matemática. Tuvo especial cuidado de aclararlo muy bien en los Principia, cuando sentenció, en el Escolio General: *Hypothese no fingo* ("Hipótesis no fabrico"), su célebre frase para protegerse de la crítica de que buscaba propiedades ocultas, prácticamente mágicas, en la materia.

Para no dejar dudas al respecto, Newton explicó en detalle su posición en una serie de cartas dirigidas al clérigo Bentley,[20] que le había solicitado argumentos para refutar el ateísmo:

> Es inconcebible que la materia bruta inanimada pueda (sin la mediación de algo más que no sea material) afectar y operar sobre otra materia sin contacto mutuo… Que la gravedad sea innata, inherente y esencial a la materia de modo tal que un cuerpo pueda actuar sobre otro a distancia a través del vacío sin la mediación de nada más… para mí es un absurdo tan grande que creo que nadie competente en asuntos filosóficos lo podría aceptar. La gravedad debe tener su causa en algún agente que actúa constantemente de acuerdo con ciertas leyes, pero si este agente es material o inmaterial es una cuestión que he dejado a la consideración de mis lectores.

Sin embargo, Newton estaba convencido de que la gravedad no se debe a la mediación de alguna sustancia material común; lo demostró en forma convincente en el Libro II de los *Principia*, donde analiza minuciosamente el movimiento

de los fluidos y desbarata todo el sistema cartesiano según el cual los planetas se mueven arrastrados por el Éter, una sustancia muy sutil pero material al fin. Además, Newton creía firmemente en la existencia de los átomos y pensaba —¡una vez más en contra de Descartes!— que entre éstos sólo podía existir el vacío. ¿Qué produce, entonces, la atracción entre dos cuerpos distantes si no un medio material? En varios de sus manuscritos alude a un espíritu inmaterial que llena todo el espacio y a quien se debe la acción a distancia a través del vacío; se puede especular que se trata de Dios que sabe dónde está un cuerpo que atrae a otro, pero Newton nunca aclaró qué tenía exactamente en mente. De hecho, no podía saberlo con los conocimientos de su época, pero es seguro que nunca consideró un ente material; en eso, quizás intuyó lo que es el campo de la física moderna, [21] al cual volveremos en el capitulo IX.

El campo

El problema de la acción a distancia, que tanto preocupó a los filósofos naturales de la época de Newton y la subsiguiente, parecía estar empantanado. Antes de llegar a una solución, empezó a ser relegado a un segundo plano para luego resurgir —como veremos en el capítulo VI— en una forma nueva e inesperada. En el siglo XIX, el interés de los filósofos naturales cambió hacia otro fenómeno donde también se manifiesta una acción a distancia: la electricidad y el magnetismo (que ya habían sido estudiados por Gilbert y el mismo Newton), así como la relación existente entre los dos fenómenos. La gravitación pasó temporalmente a retiro.

Más de dos siglos después de Gilbert y su estudio de los imanes, Hans Christian Oersted descubrió un nuevo fenómeno relacionado con el magnetismo: el hecho de que una corriente eléctrica desvía un imán. Algunos años después, André-Marie Ampère —cuyo apellido se inmortalizaría co-

mo unidad de corriente eléctrica— descubrió que dos corrientes eléctricas se atraen o se repelen, dependiendo de la dirección en la que fluyen. Ampère concluyó que el magnetismo se debe a corrientes eléctricas microscópicas en la materia; lo cual, como sabemos ahora, es esencialmente correcto. Empezaba así a vislumbrarse una conexión entre la electricidad y el magnetismo, dos fenómenos que hasta entonces parecían sin relación entre ellos.

El siguiente descubrimiento experimental de gran importancia se debe a Michael Faraday, quien demostró que el movimiento de un imán cerca de un cable conductor induce una corriente eléctrica en éste. Unas cuantas décadas después, la ley de inducción de Faraday habría de convertirse en el principio básico de todos los mecanismos para generar y utilizar energía eléctrica. Por otra parte, para explicar cómo atrae un imán al hierro, Faraday inventó el concepto *de líneas de fuerza*, que son líneas invisibles e impalpables que emanan de un imán e influyen sobre objetos lejanos.

Finalmente, alrededor de 1860, James Maxwell reunió todo lo que se sabía en su época sobre la electricidad y el magnetismo, y lo expresó en términos de ecuaciones matemáticas. Uno de los principales éxitos de su teoría fue demostrar que la luz es una onda electromagnética; así, puso fin (aparentemente) a una vieja discusión sobre la naturaleza de la luz.

Un concepto físico fundamental de la teoría de Maxwell es el de campo. Siguiendo con la idea de las líneas de fuerza de Faraday, Maxwell definió al campo como una forma de "energía sin materia", que se describe matemáticamente de la misma forma que la gravedad de Newton: en cada punto del espacio, el campo tiene cierto valor que determina cómo se mueve una carga eléctrica colocada allí. La energía, un concepto asociado a los cuerpos materiales, ahora aparecía sin relación con la materia; algo que podría recordar cosas tan controvertibles como la "mente sin cuerpo"...

La ciencia del siglo XIX elucidó, tanto en teoría como en experimentos, la naturaleza de las fuerzas eléctricas y magnéticas. Al comprobar que la materia puede actuar sin la mediación de algo también material, fue aceptada finalmente la idea que Leibniz consideraba absurda, ¡y nadie se preocupó más del asunto! En lugar del Éter de Descartes o del Dios de Newton que gobierna el Universo, surgió el concepto del *campo*, un ente inmaterial, pero de efectos perfectamente tangibles y tan real como la materia. Lo que era un problema de fondo en la época de estos sabios dejó de serlo para los filósofos naturales de las siguientes generaciones. Hay que reconocer que Newton tuvo más razón que Leibniz: en la física moderna, el campo es efectivamente una sustancia inmaterial, que se describe matemáticamente al igual que la gravitación.

Sea lo que fuere, el concepto de campo, gracias a su éxito para explicar los fenómenos naturales, llegó para formar parte definitivamente del bagaje de la ciencia moderna. Los físicos del siglo XX, a diferencia de sus colegas de épocas anteriores, dejaron de cuestionarse sobre la realidad de esta forma de "energía sin materia". El problema, de todos modos, estaba lejos de quedar resuelto, pero habría de tomar un nuevo giro con la aparición, en el siglo XX, de la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica, como veremos en los siguientes capítulos.

[13] *La estructura de las revoluciones científicas*, 18ª reimpresión, FCE (Breviarios), México, 2004.

[14] P. Feyerabend, *Contra el método,* Ariel, Barcelona, 1974.

[15] Puesto en términos modernos, el momento angular de un planeta es el triple producto de su masa, su distancia al Sol y su velocidad perpendicular a la dirección radial hacia el Sol. Es esta componente de la velocidad, y no la total, la que varía en proporción inversa a la distancia al Sol.

[16] El texto se puede encontrar, por ejemplo, en A. Koyré, *Newtonian Studies,* University of Chicago Press, 1965.

[17] A. Koyré, "La gravitation universelle de Kepler à Newton", *Arch. Inst. Histoire des Sciences* 4: 638, 1951.

[18] A. Koyré, "Huygens and Leibniz on Universal Attraction", *Newtonian Studies,* University of Chicago Press, 1965, p. 115.

[19] *Ibid.*, p. 130.

[20] En *Isaac Newton's Papers and Letters on Natural Philosophy,* I. B. Cohen (comp.), Harvard University Press, 1978, p. 271.

[21] Véase, por ejemplo, N. Lara Zavala, "Materia, Newton y espacio vacío", en M. Beuchot, L. Benítez, J. A. Robles et al., *El concepto de materia,* Colofón, México, 1992.

IV. Energía, entropía y la dirección del tiempo

Para nosotros, físicos convencidos, la diferencia entre pasado, presente y futuro no tiene más sentido que el de una ilusión tenaz.

A. Einstein (carta a Michèle Besso)

Después de Newton y sus disquisiciones sobre el Tiempo Absoluto, los físicos no se volvieron a preocupar mucho por el concepto del tiempo. Desde un punto de vista puramente pragmático, tomaron al tiempo como una variable t que aparece muy convenientemente en las ecuaciones de la mecánica. Sin embargo, un detalle no pasaba desapercibido: era evidente que las ecuaciones de Newton, que describen la evolución dinámica de un sistema físico, no cambian de forma si se invierte en ellas el sentido del tiempo, para lo cual sólo hay que cambiar el signo de la variable t. Esa inversión no afecta para nada las ecuaciones básicas, ya que la velocidad cambia de sentido pero no la aceleración;[22] siendo la fuerza proporcional a la aceleración, las leyes del movimiento siguen siendo las mismas. En consecuencia, el tiempo, en la física newtoniana, puede fluir tanto en un sentido como en otro, sin que haya una distinción entre pasado y futuro.

Esta simetría entre pasado y futuro no debería ser sorprendente. Después de todo, la mecánica newtoniana nació con el propósito principal de explicar el movimiento de los planetas y éstos pueden girar tanto en un sentido como en otro; si se invierte el sentido del tiempo, cambia la dirección de la velocidad, pero no se altera la fuerza gravitacional. Si un observador extraterrestre filmara el movimiento de los planetas y después proyectara su película al revés, vería a los planetas girar en un sentido contrario al que lo hacen en el mundo real, pero eso sería perfectamente factible de acuerdo con la ley de la gravitación universal; por ejemplo, se seguirían cumpliendo las tres leyes de Kepler. Nuestro hipotético observador lejano no podría determinar, sólo vien-

do la película, en qué sentido la está proyectando; las leyes de Newton no le darían ningún indicio al respecto.

Pero es un hecho bien sabido y confirmado que el tiempo fluye en un solo sentido y que ninguna simetría entre pasado y futuro se manifiesta en la vida diaria. Si empujamos una piedra sobre el suelo, ésta no regresa a su posición inicial después de soltarla; si dejamos caer una pelota desde cierta altura, ésta rebota cada vez menos; si derramamos un vaso de agua, el charco no brinca espontáneamente de regreso al vaso. La diferencia básica con el movimiento de los planetas radica en el fenómeno de la fricción: cuando un cuerpo se mueve en contacto con otro, el rozamiento produce calor, pero lo contrario no es cierto: el calor así producido no produce movimiento de regreso. En cambio, los planetas se mueven por el espacio vacío sin resentir ninguna fricción, a diferencia de los objetos materiales que se arrastran sobre la Tierra.

El calor generado por la fricción es una forma de energía irrecuperable que no se puede aprovechar para regresar las cosas a su estado inicial. Este proceso es la única manifestación en la física clásica de una diferencia entre pasado y futuro; los físicos empezaron a interesarse seriamente en él durante la Revolución Industrial. Con el propósito específico de describir el funcionamiento de las máquinas de vapor, tuvieron que crear una nueva rama de la física, la termodinámica, e introducir dos nuevos conceptos: la energía y la entropía.

Energía

Algunas veces el lenguaje científico asimila una palabra de uso común a tal punto que su verdadero origen se olvida. Parece entonces que cierta palabra tuvo siempre el significado preciso que la ciencia le impuso, cuando es la ciencia,

con sus continuos descubrimientos, la que tiene que recurrir al acervo del lenguaje común.

Un ejemplo claro es la palabra "energía", que describe uno de los conceptos más básicos de la física. A pesar de que lo oímos nombrar frecuentemente, se trata de un concepto relativamente nuevo. Newton ni siquiera se refiere a la energía en su obra y lo más cercano que podemos encontrar por esa época es el concepto de *vis viva* de Leibniz, que es la masa de un cuerpo multiplicada por el cuadrado de su velocidad; en lenguaje moderno, se trata simplemente del doble de la energía cinética; Leibniz notó que en el choque entre dos partículas, la *vis viva* total debía conservarse, lo cual anticipaba lo que después se conocería como conservación de energía. No fue sino hasta mediados del siglo XIX cuando la física se apropió de la palabra "energía" para designar un concepto puramente teórico cuya utilidad y trascendencia habían sido recién descubiertas en esa época. Hasta entonces, la energía era un concepto bastante vago y puramente cualitativo; por ejemplo, el diccionario moderno de la Real Academia le asigna dos acepciones: "Eficacia, poder, virtud para obrar" y "fuerza de voluntad, vigor y tesón en la actividad", y sólo después pasa a las definiciones consagradas por la física.

La energía, tal como la conocen los físicos, es un descubrimiento teórico y, en contra de lo que digan algunos libros de texto escolares, no se trata de un concepto primario como la distancia, la velocidad o la masa. Como veremos más detalladamente en el capítulo IX, su única definición es en términos matemáticos: es una cierta función matemática que depende, según el caso, de la posición, la velocidad, parámetros como la temperatura, o de la intensidad del campo electromagnético. La gran utilidad del concepto de energía radica en su propiedad de permanecer constante en el tiempo, lo cual es una consecuencia directa de la segunda ley de Newton y la puede reemplazar en forma más conveniente. De hecho, este concepto vino a reemplazar el de fuerza,

pues resultó ser de una enorme riqueza y utilidad; su conservación se ha vuelto una de las leyes más fundamentales de la física.

En resumen, al bautizar ese ente matemático con el nombre de energía, los físicos del siglo XIX pudieron hablar coloquialmente de la "conservación de la energía". ¡Por supuesto, no tendría sentido hablar de la conservación de la "virtud para obrar" o de la "fuerza de voluntad"! Así, un concepto matemático, con un nombre bien escogido, permitió situar en una nueva perspectiva toda una serie de fenómenos (movimiento, calor, trabajo realizado por una máquina, etcétera) que hasta entonces se manifestaban en forma aparentemente desconectada. Independientemente de las definiciones, lo importante fue poner de manifiesto una ley fundamental de la naturaleza: la ley de la conservación de la energía.

> Es importante darse cuenta que hoy en día, en física, no sabemos lo que es la energía… Sin embargo, hay fórmulas para calcular algunas cantidades numéricas, y cuando sumamos todo da siempre… el mismo número. Es una cosa abstracta en el sentido de que no nos dice nada sobre el mecanismo o la razón de las diversas fórmulas.[23]

Entropía

Aristóteles afirmaba algo que debía ser de sentido común: para mantener constante la velocidad de un cuerpo (una piedra, una carreta, etc.) hay que aplicarle continuamente una fuerza. Pero, por otra parte, la primera ley de Newton estipula que un cuerpo, puesto en movimiento, debe seguir moviéndose en línea recta y con velocidad constante en ausencia de fuerzas aplicadas sobre él. La contradicción se resuelve al notar que, estrictamente hablando, las leyes de Newton son válidas para cuerpos que se mueven sin fricción, como son los planetas. Cuando se trata de cuerpos mundanos que tienen que arrastrarse por el piso, la fricción estropea la sencilla perfección de esas leyes.

El fenómeno de la fricción encaja con mucha dificultad en el sistema newtoniano. Se sabe ahora que la fricción produce calor, el cual es una forma de energía, y la eficiencia de una máquina de vapor depende de la cantidad de calor generado, como bien entendieron los físicos de principios del siglo XIX. Así, por ejemplo, el conde de Rumford, efectuó un experimento clásico que consistió en medir el calor producido por una broca que taladra un cañón y cuantificarlo. Lo fundamental es que el trabajo de una máquina produce calor que no se puede recuperar para regresar la máquina a su estado inicial.

Una vez establecidos conceptos como energía, trabajo y calor, resultaba evidente que existía una conexión profunda entre ellos. Todavía a mediados del siglo XIX se pensaba que el calor era una especie de sustancia y que su cantidad total en el Universo se conservaba. Sin embargo, en un trabajo clásico de 1850, Rudolf Clausius lo identificó claramente como una manifestación de la energía cinética de las partículas de un cuerpo y formuló las dos leyes fundamentales de la termodinámica. La primera ley relaciona el calor con la energía intrínseca y el trabajo realizado, y la segunda ley estipula que siempre fluye de un cuerpo caliente a uno frío, y nunca al revés.

Clausius siguió cavilando sobre el problema durante los siguientes quince años y, en 1865, publicó un nuevo artículo en el que aparecía, por primera vez, el concepto fundamental de “entropía”. La entropía se puede interpretar como una medida de la energía que ya no se puede aprovechar.

Las dos leyes de la termodinámica, postuladas por Clausius, tomaron entonces la forma:

1. La energía total del Universo es constante.

2. La entropía del Universo tiende a aumentar.

Estrictamente hablando, la entropía de un cuerpo se define como una cantidad que aumenta en la misma proporción que el calor generado, siendo el factor de proporcionalidad el inverso de la temperatura. Es decir, el cambio en la cantidad de calor es igual a la temperatura multiplicada por el cambio en la entropía.

De acuerdo con la primera ley de la termodinámica, cuando un sistema físico sufre alguna modificación, su energía cambia de dos formas distintas. Una es un cambio que produce algún movimiento y se manifiesta en la realización de algún trabajo. La otra es una generación de energía en forma de calor, proporcional al cambio de la entropía, y no es aprovechable.

A su vez, la segunda ley de la termodinámica postula que, en todo proceso físico, la entropía debe aumentar o al menos permanecer constante a medida que transcurre el tiempo. Ésta es la única ley de la física clásica en la que aparece una distinción entre pasado y futuro, pero es una ley del todo empírica, por lo menos en la forma en la que la propuso Clausius. Ni las ecuaciones de la mecánica, ni ninguna ley fundamental de la física clásica, implican que deba existir una dirección del tiempo. A pesar de que la experiencia nos enseña todo lo contrario, pasado y futuro son sólo conceptos relativos en la mecánica de Newton y deducir la segunda ley de la termodinámica a partir de esa mecánica perfectamente reversible no es posible, a menos de que se introduzca un elemento adicional: la probabilidad.

La primera ley de la termodinámica se puede deducir a partir de una interpretación molecular de la materia. Si observamos el comportamiento de un gas con un microscopio, vemos moléculas que se mueven con distintas velocidades y en todas las direcciones posibles,[24] chocando continuamente unas con otras. Desde el punto de vista microscópico, la temperatura es simplemente una medida de la energía cinética promedio de todas las moléculas: mientras más caliente

está un cuerpo, mayor es la velocidad con la que se agitan sus moléculas.

En cuanto a la segunda ley, los físicos después de Clausius trataron de demostrarla a partir de principios fundamentales, pero Ludwig Boltzmann es el único a quien se le puede adjudicar un éxito parcial. El meollo del asunto consiste en que las partículas tienen cierta energía cinética[25] y continuamente chocan entre sí; y en cada choque, intercambian entre ellas parte de su energía. Si bien la energía total de un gas se conserva, cada vez se pierde más información sobre las condiciones iniciales con las que empezaron a moverse las partículas.

Boltzmann creía firmemente en la existencia de las moléculas y desarrolló lo que se conoce actualmente como la teoría cinética de los gases, rama de la física que estudia el comportamiento estadístico de sistemas compuestos de un número muy grande de partículas. Como ya mencionamos, las moléculas de un gas se mueven y chocan unas con otras constantemente. En principio se podría describir el movimiento de cada molécula por medio de las ecuaciones de Newton, pero, en la práctica, un programa así sería imposible de llevar a cabo, pues habría que calcular el comportamiento de unas 10^{28} moléculas; por otra parte, tampoco tiene sentido realizar un cálculo así ya que, después de todo, no nos interesa lo que hace cada partícula individualmente, sino el comportamiento en bloque de la materia. Lo que sí tiene sentido es calcular la probabilidad de que una molécula cualquiera tenga cierta velocidad y se encuentre en cierta posición. A partir de esa probabilidad, se pueden obtener las características principales de un gas, como su densidad, temperatura, velocidad promedio, sin tener que preocuparse por lo que hace cada molécula por separado. Esa probabilidad evoluciona dinámicamente, y su cambio temporal debe deducirse de las ecuaciones de Newton. Ése es el programa que emprendió Ludwig Boltzmann.

Boltzmann utilizó un enfoque estadístico. A partir de las leyes básicas de la mecánica, mostró que existe una cierta cantidad física, a la que llamó función *H*, que depende justamente de la probabilidad de encontrar una partícula con una cierta velocidad y en cierta posición, y que esa cantidad debe disminuir con el tiempo. Éste es el llamado teorema *H* de Boltzmann. La función *H*, con el signo cambiado, se puede identificar con la entropía; el hecho de que siempre aumenta es el resultado de los múltiples choques entre moléculas: cada choque hace más difícil rastrear las condiciones iniciales de una molécula, de tal forma que después de múltiples choques se pierde la información sobre el estado inicial del gas. Esa pérdida de información corresponde justamente al aumento de la entropía. Dicho de otro modo, todo sistema físico compuesto de un gran número de partículas, cuando evoluciona libremente y sin interferencias externas, tiende a pasar de un estado bien ordenado a uno desordenado. La entropía es, en cierto sentido, una medida del desorden y tiende a aumentar a medida que pasa el tiempo. Éste es el único proceso de la física clásica que distingue entre pasado y futuro.[26]

Podemos ilustrar lo anterior con un ejemplo pintoresco. Supongamos que tenemos una pequeña caja en la que se encuentran algunas docenas de pulgas (figura IV.1), colocada en otra caja mucho mayor. Cuando destapamos la caja, las pulgas salen y empiezan a saltar en forma azarosa en todas direcciones; como resultado, a medida que pasa el tiempo, el conjunto de pulgas se difunde cada vez más en la caja grande. En un principio, sabemos que cada pulga se encontraba en la caja de origen, pero después de algún tiempo, el sistema se vuelve más desordenado y es cada vez más difícil saber dónde anda una pulga individualmente y cuántas hay en una región determinada. Así, pasamos de un estado de mucha información a uno de poca información, o, equivalentemente, de un estado con poca entropía a uno con mucha. Por otra parte, si filmamos todo el proceso y

proyectamos la película al revés, veríamos algo muy improbable: que las pulgas coordinaran sus movimientos de tal forma que en un instante preciso, todas ellas brincaran simultáneamente de regreso a la caja pequeña. Sin embargo, si seguimos el movimiento de una pulga individualmente, no podríamos deducir que la película se está proyectando al revés ya que sólo veríamos que brinca en forma aleatoria y que, en algún momento, casualmente se mete a la caja pequeña. La diferencia entre pasado y futuro se manifiesta únicamente como una propiedad en conjunto de todas las pulgas.

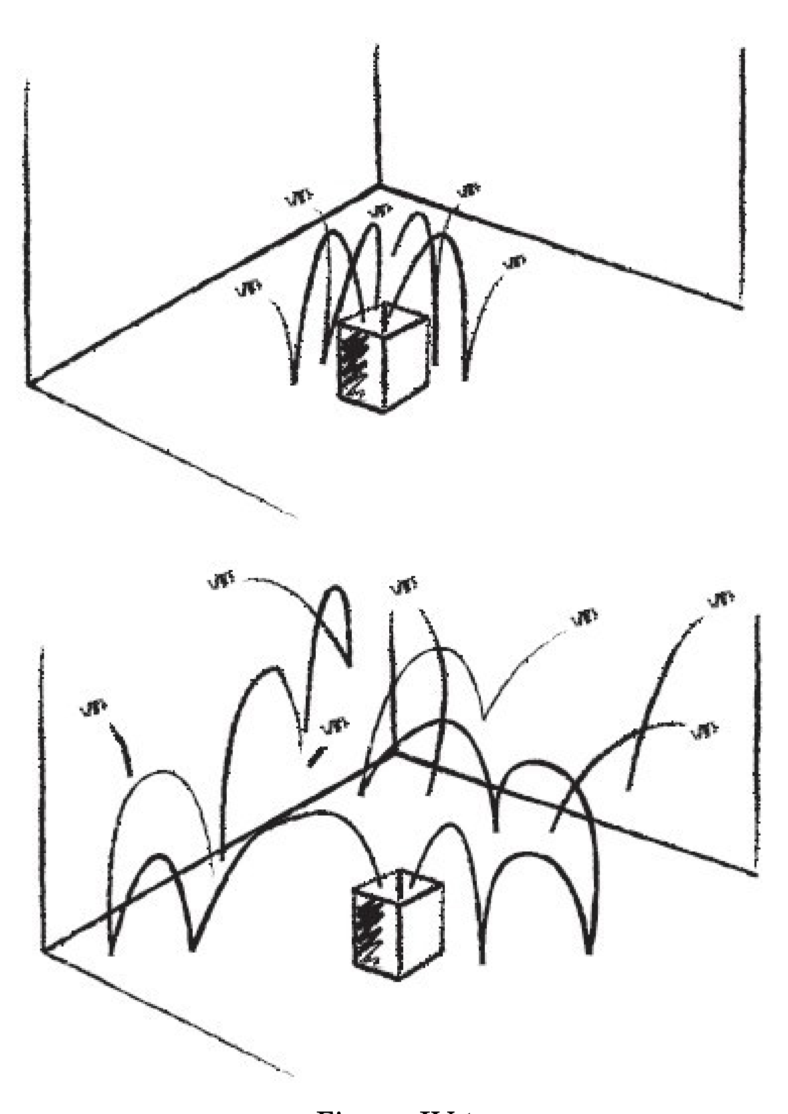


Figura IV.1

Boltzmann llegó a una definición más profunda del concepto de la entropía desde dos direcciones distintas. El primero, que acabamos de mencionar, es un tratamiento dinámico; el segundo es una concepción mucho más general relacionada con la probabilidad. La conexión entre entropía y pérdida de información lo condujo a elaborar una definición de la entropía que no depende de los procesos físicos entre moléculas ni de su movimiento. En su nueva forma, más

fundamental por estar basada en argumentos estadísticos muy generales, la entropía se expresa por medio de la famosa ecuación de Boltzmann:

$$S = -k \ln P,$$

que relaciona directamente la entropía S de un sistema físico con el logaritmo natural (ln) de la probabilidad P de encontrarlo en un estado dado. El factor de proporcionalidad k se conoce como constante de Boltzmann, y tiene el valor $k = 1.38 \times 10^{-16}$ erg/K.

De acuerdo con la física estadística y la interpretación de Boltzmann, el tiempo fluye en una sola dirección, del pasado al futuro, porque es inmensamente más probable que así suceda... pero no absolutamente imposible lo contrario. Dicho de otro modo, el sentido del tiempo es una propiedad estadística.

Para ilustrar la relación entre probabilidad y entropía, tomemos un ejemplo común: un vaso de agua cuyo contenido se derrama en el suelo. En este proceso, la energía potencial que poseía inicialmente el agua debido a su posición, se transforma en energía cinética (de movimiento) de las moléculas al llegar al suelo, lo cual se percibe como un aumento del calor contenido en el agua. Por supuesto, como es bien sabido, esa energía en forma de calor ya no se puede restituir al charco para que brinque de regreso al vaso; de suceder algo así, estaríamos en presencia de un milagro. ¿Qué tan probable es que se produzca tal milagro? Visto a través de un microscopio, el charco en el suelo está formado de billones de billones de moléculas que se mueven azarosamente; si seguimos la trayectoria de una sola molécula, veremos que ésta se mueve en forma zigzagueante debido a los constantes choques con otras moléculas. Sin embargo, si filmamos el movimiento de esa única molécula y proyectamos la película al revés, todo lo que veremos es una molécula en el suelo que, debido al choque constante con otras moléculas, unas veces sube y otras baja; nada que indique la violación de alguna ley fundamental de la física. Las leyes de Newton

describen perfectamente un proceso de subida; de hecho, así es como las moléculas de agua se evaporan y suben a las partes más altas de la atmósfera.

Ahora bien, podría suceder, en principio, que todas las moléculas en un charco, por pura coincidencia, coordinaran sus movimientos espontáneamente de tal suerte que brincaran de regreso al vaso, tal como en el ejemplo de las pulgas que regresan a la caja. Ya vimos que un proceso así es muy improbable, mucho más para moléculas que para pulgas, pues un charco de agua contiene unas 10^{26} moléculas. Una situación milagrosa podría suceder; sería extremadamente improbable, pero de ningún modo violaría las leyes de Newton.

La fórmula de Boltzmann para la entropía permite calcular la probabilidad[27] de que las velocidades y posiciones de las moléculas sean tales que el charco vuelva de regreso al vaso. Para ello, hay que igualar su energía potencial del agua con el calor producido por la caída. En general, un cuerpo de masa m a una altura h tiene una energía potencial mgh, donde g es la aceleración de la gravedad; esta misma energía dividida por la temperatura T es la entropía S generada por la caída:

$$S = \frac{m g h}{T}$$

Utilizando la fórmula de Boltzmann, podemos darnos una idea de cuál es la probabilidad de que todas las moléculas se coordinen accidentalmente y brinquen de regreso al vaso. Para ello, sustituimos en esa fórmula el valor de la entropía que obtuvimos, y resulta que tal probabilidad es:

$$P = e^{-m g h / k T}$$

Veamos un par de ejemplos concretos. Para un cuerpo de un kilogramo a temperatura ambiente (unos 300° K), la probabilidad de brincar de regreso a una altura de un metro resulta ser del orden de una parte en $10^{10^{21}}$. Para fines de com-

paración, nótese que el número de átomos en el universo visible es de unos 10^{80}. Por lo tanto, ver un charco brincar de regreso a un vaso es tan improbable como ganar el premio mayor en una lotería en la que hay unos $10^{10^{19}}$ números concursantes por cada átomo en el Universo.

A título de comparación, calculemos qué sucede con una sola molécula de oxígeno. En la atmósfera terrestre, las moléculas chocan continuamente unas con otras; si seguimos la trayectoria de una sola, veríamos que a veces se acerca al suelo y a veces sube a varios kilómetros de altura debido a esos choques que la arrojan en diversas direcciones en forma aleatoria. Tomando en cuenta que la masa de una molécula de oxígeno es de unos 2.5×10^{-25} gramos, un cálculo enteramente análogo utilizando la fórmula anterior muestra que la probabilidad de que una molécula en el suelo regrese espontáneamente a una altura de un kilómetro es de un 87 por ciento. Una molécula que "cayó" desde una altura de un kilómetro regresará *casi seguramente* a esa misma altura. Esto es lo que hace que nuestra atmósfera tenga un cierto espesor y no esté concentrada a ras del suelo. ¡Gracias a que la segunda ley de la termodinámica *no* se aplica a las moléculas individuales, existe la atmósfera que respiramos!

De hecho, volviendo al ejemplo del charco, las moléculas del agua derramada continuamente se evaporan hasta que no queda ninguna y el suelo está seco. En principio puede suceder, por pura casualidad, que algunas de esas moléculas regresen al vaso de donde cayeron. Eso no es tan improbable; lo que es inmensamente improbable es que *todas* las moléculas, por pura coincidencia, lleguen al vaso en forma simultánea (tal como en el ejemplo de las pulgas en la caja).

Lo anterior parece indicar que la dirección del tiempo es, en efecto, una propiedad estadística que se aplica a sistemas compuestos de billones de partículas, pero no tiene sentido para una molécula sola. El paso del tiempo es semejante a la temperatura, el calor y la entropía, en tanto que propiedad estadística; todos estos conceptos se refieren a manifestacio-

nes a gran escala del movimiento de las moléculas, pero no se pueden aplicar a una sola. Si vemos al tiempo fluir en un sentido y no en otro es porque somos seres hechos de un inmenso número de moléculas. De acuerdo con lo que sabemos de física, el hecho de que el tiempo fluya al revés no es imposible, sólo es extremadamente improbable.[28]

Electromagnetismo

Todos los fenómenos eléctricos y magnéticos obedecen las leyes descritas matemáticamente por las ecuaciones de Maxwell. Éstas, sin embargo, no implican ninguna dirección temporal ya que no cambian de forma si se invierte en ellas el signo del tiempo. En consecuencia, la luz, que es una onda electromagnética, debería propagarse tanto hacia el futuro como hacia el pasado; evidentemente, sólo percibimos el primer caso.

Veamos un ejemplo concreto. Cuando se prende un foco, la luz sale radiada en forma de un frente de ondas: una esfera que se expande a la velocidad de la luz. Pero las ecuaciones de Maxwell admiten también una segunda solución: un frente de ondas en el pasado que abarca todo el Universo, el cual, contrayéndose a la velocidad de la luz, llega al foco justo en el instante en que se prende.

Por supuesto, la segunda solución contradice nuestras ideas de causalidad. Implica que, hace billones de años, se formó una onda electromagnética que “sabía” en qué momento se prendería el foco, para converger justo ahí. Lo importante, sin embargo, es que se trata de una solución de las ecuaciones de Maxwell que es perfectamente válida desde el punto de vista matemático. *A priori*, no hay motivo para descartarla.

Una manera de darle la vuelta al problema consiste en “olvidar” la solución que describe la onda originada en el pasado con el argumento de que tal cosa no se observa en la

realidad. Pero este recurso *ad hoc* no aclara por qué sólo la onda saliente se observa y, peor aún, conduce a otra clase de contradicciones relacionadas con la forma en la que las cargas eléctricas radian energía.

Una propuesta de implicaciones más profundas fue elaborada por varios físicos en los años veinte, y retomada un par de décadas después por John A. Wheeler y Richard Feynman. Se trata de la teoría del absorbedor, que supone, en esencia, que, para que un cuerpo emita radiación electromagnética, debe haber necesariamente otro cuerpo que absorba esa radiación en algún momento en el futuro… ¡y reemita al pasado!

Así, al prender un foco, la radiación electromagnética que emite viaja hacia el futuro y es absorbida por otro cuerpo, quizás en otra galaxia, el cual emite una radiación hacia el pasado que llega al foco justo cuando se prende. Se puede decir, entonces, que la radiación existe en pares, entre un emisor y un receptor, como en un juego de *ping-pong* en el que una pelota viaja en un sentido en el tiempo, simultáneamente con otra que viaja en sentido contrario. De esta forma, se mantiene la simetría entre pasado y futuro implícita en las ecuaciones de Maxwell.

Ahora bien, en la práctica existen multitud de cuerpos distribuidos por todo el Universo que absorberán en el futuro la radiación emitida por mi foco. En principio, pueden reemitirla de regreso tanto hacia el futuro como *hacia el pasado*, hacia la fuente original de radiación. El punto esencial del argumento de Wheeler y Feynman es que las contribuciones hacia el pasado de todos los absorbedores del Universo se cancelan mutuamente si el número de éstos es muy grande: por ello sólo vemos radiación propagándose del pasado al futuro.

Por supuesto, esta explicación choca con nuestros conceptos comunes de causalidad. El físico H. Tetrod, uno de los proponentes originales de la teoría del absorbedor, lo ex-

presó en forma muy clara en su artículo de 1922 (citado por Wheeler y Feynman, *Review of Modern Physics*, 17: 157):

> El Sol no radiaría si estuviera solo en el espacio y ningún otro cuerpo pudiese absorber su radiación… Si, por ejemplo, observé anoche a través de mi telescopio una estrella que está, digamos, a 100 años luz de distancia, entonces no sólo sé que la luz que llegó a mis ojos fue emitida hace cien años, sino también que esa estrella o sus átomos individuales sabían hace cien años que yo, quien ni siquiera existía en aquel entonces, la miraría anoche…

Pero como ya mencionamos, el paso del tiempo parece ser una propiedad estrictamente estadística de la materia. Hasta ahora, la única explicación física del flujo del tiempo es en términos de probabilidades: es inmensamente más probable que el tiempo transcurra del pasado al futuro que al revés.

La teoría del absorbedor es bastante consistente y parece estar libre de contradicciones teóricas,[29] si se acepta que no hay distinción entre pasado y futuro, y que la acción a distancia —la misma que tanto molestaba a Newton y sus contemporáneos— es una acción que se propaga a la velocidad de la luz, pero… ¡tanto hacia el futuro como hacia el pasado! Es un indicio más de que el tiempo no forma parte del mundo material, sino que es una forma de percepción propia de nuestro aparato cognitivo.

CPT

El hecho de que no existe distinción entre pasado o futuro para una partícula del mundo atómico, se manifiesta en una forma muy notable si tomamos en cuenta las antipartículas. En el mundo de las partículas subatómicas, existe una simetría tal que a cada partícula le corresponde una antipartícula, con esencialmente las mismas características, excepto la carga eléctrica, que es de signo contrario; por ejemplo, al electrón le corresponde el positrón, que es idéntico a él excepto por su carga que es de signo positivo.

Existe una simetría entre partículas y antipartículas, en el sentido de que las leyes físicas que rigen su comportamiento son las mismas. Pero la simetría es completa sólo si se in-

cluye el espacio y el tiempo. Más precisamente, se puede demostrar rigurosamente, en el marco de la teoría cuántica de las partículas elementales, que las leyes de la física permanecen inalteradas si se invierten tanto el espacio como el sentido del tiempo, y se intercambian simultáneamente partículas por antipartículas. Dicho de otro modo, una antipartícula se comporta exactamente como una partícula, vista en un espejo, que viaja hacia atrás en el tiempo. Esta simetría total es consecuencia del llamado teorema CPT (simetría de Carga, Paridad y Tiempo) que es, a su vez, una consecuencia matemática del principio de relatividad aplicada a la teoría cuántica de campos (a la que volveremos en el capítulo IX). Es decir, una violación de la simetría CPT implicaría también una violación del principio de relatividad.

Hasta mediados del siglo XX, se creía que las leyes de la física son invariantes ante cambios de paridad, es decir, son las mismas en este mundo y en el que se ve en un espejo. No hay manera de distinguir la realidad de su reflejo (si miro en un espejo, veo las letras al revés, pero ninguna ley física prohíbe escribir al revés). Pero en 1956, dos físicos de origen chino, T. D. Lee y C. N. Yang, propusieron una nueva explicación teórica del *decaimiento beta*, una reacción nuclear que ocurre en algunos núcleos atómicos que emiten espontáneamente un electrón. De acuerdo con Lee y Yang, se deberían ver más electrones emitidos en una cierta dirección, definida por el giro del núcleo, que en la dirección contraria. Visto en un espejo, esto correspondería a una reacción que no ocurre en el mundo real: los electrones se verían emitidos en la misma dirección, pero el núcleo se vería girando en sentido contrario. La predicción fue confirmada ese mismo año, en el laboratorio de la Universidad de Columbia, por Chien-Shiung Wu.[30]

A pesar de ese descubrimiento, los físicos teóricos se dieron cuenta de que la simetría no estaba del todo perdida: lo que se ve en el espejo sería idéntico a lo que haría un antinúcleo atómico, compuesto de antiprotones y antineutro-

nes, que emitiera un positrón por decaimiento beta. Las leyes de la física son las mismas en el antimundo, a condición de que se mire en un espejo. Esto es lo que en términos técnicos se llama simetría CP (C por carga, P por paridad).

Pero la naturaleza resultó ser más complicada. Además de las partículas elementales que hemos mencionado más arriba, existen otras que son de muy corta vida y sólo se pueden producir en los grandes aceleradores de partículas. Una de estas partículas exóticas es el llamado *kaón*, que vive menos de una billonésima de segundo y se desintegra en otro tipo de partícula elemental que se llama *pión*.

Ahora bien, resulta que de acuerdo con las leyes del mundo cuántico, el kaón neutro es, en realidad, una superposición de dos estados: un kaón y un antikaón. Según la superposición, se tiene dos tipos de kaones, uno de vida larga y otro de corta. La teoría predice que si se cumple la simetría CP, el primero decae en tres piones, y el segundo en dos piones.

Pero en 1964 los físicos descubrieron que el kaón de larga vida también decae ocasionalmente en dos piones, lo cual implica que la simetría CP no es una simetría perfecta de la naturaleza. La única simetría perfecta tiene que incluir, además, una inversión del tiempo: si uno mira las antipartículas en un espejo, lo que ve es lo que harían las partículas si el tiempo fluyese al revés. Las antipartículas se comportan como partículas que viajan hacia atrás en el tiempo y la asimetría CP es la única evidencia de que existe una distinción entre pasado y futuro en el mundo atómico. (Esto no implica que la antimateria sirva como máquina del tiempo: el sentido del tiempo surge como una propiedad estadística de los objetos macroscópicos compuestos de billones y billones de átomos… o antiátomos).

La falta de una simetría CP completa podría ser la clave para aclarar uno de los grandes misterios del Universo: si materia y antimateria se parecen tanto, ¿por qué el mundo

está hecho de materia y no de antimateria? Regresaremos al tema en el capítulo X.

* * *

En resumen, el tiempo surge sólo cuando percibimos sistemas de billones de billones de átomos (como son todas las cosas que observamos directamente).

[22] La aceleración es la segunda derivada de la posición con respecto al tiempo *t,* y, por lo tanto, es independiente del signo de *t.*

[23] R. P. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics,* vol. 1, cap. 4, Addison Wesley, 1963.

[24] La velocidad promedio se percibe como la velocidad en bloque del gas.

[25] También poseen energía potencial, debido a su posición en el espacio. Sin embargo, en un choque entre partículas, que ocurre en un mismo punto espacial, la energía potencial no cambia y, por lo tanto, no juega un papel importante.

[26] Como veremos más adelante en este capítulo, existe una asimetría en el tiempo para algunos procesos subnucleares, pero no tiene relevancia para procesos macroscópicos como los que describimos aquí.

[27] El análisis que sigue está inspirado en un artículo de J. J. Prentis, "Thank you, Boltzmann, that your constant is so small", *American Journal of Physics* 34: 392, 1996.

[28] Huw Price, en *Time´s Arrow and Archimedes' Point*, Oxford University Press, 1996, ha propuesto otra forma muy interesante de abordar el problema de la dirección del tiempo. En esencia, se puede argumentar que el hecho de que exista un vaso de agua en el pasado es tan improbable como que el charco se vuelva a juntar y brinque de regreso. De acuerdo con las leyes de la física, la existencia del vaso (y de los humanos que lo fabricaron y de los que lo llenaron), como consecuencia de la distribución inicial de materia en el Universo, es el resultado de un inmensamente improbable concurso de circunstancias. Dicho de otro modo, el problema no es por qué aumenta la entropía, sino por qué era tan baja en el pasado que permitió la existencia de cosas tan improbables.

[29] Pero no está exenta de dificultades. Para una crítica profunda, véase H. Price, *op. cit.*

[30] Lee y Yang recibieron el Premio Nobel (mas no Wu).

V. Espacio y tiempo como formas de percepción

Hay que usurpar el poder, tomar el lugar de la naturaleza y no depender de la información que nos proporciona.

Picasso

Estamos seguros de que el Sol saldrá mañana y de que una piedra caerá al soltarla. ¿De dónde nos viene esa certeza? Sabemos, gracias a nuestros sentidos, que así ha sucedido hasta ahora, pero la experiencia no nos revela lo que habrá de ocurrir en el futuro. Para deducir los acontecimientos futuros, tenemos que recurrir a la razón y no a los sentidos, lo cual nos regresa a la pregunta original: ¿cómo podemos tener la certeza de que tal o cual cosa volverá a suceder?

Percibimos el mundo con nuestros sentidos y lo comprendemos e interpretamos por medio de nuestro entendimiento. Estamos convencidos de que el mundo no es una alucinación porque la realidad parece ser la misma para todos: no hay contradicciones entre lo que yo percibo y lo que otros dicen percibir —con la excepción de los llamados locos, pero ése es otro asunto—. Esta coherencia entre nuestras percepciones y las ajenas nos conduce a la idea de una realidad externa, un mundo objetivo e independiente del sujeto que lo observa.

Sin embargo, la información captada por nuestros sentidos tiene que ser procesada por nuestra mente para reconstruir una imagen de la realidad. ¿Cómo llegamos a lo que creemos saber del mundo? ¿Hasta qué punto podemos estar seguros de que nuestros sentidos no nos engañan? ¿Qué tan correcta es nuestra facultad de entender lo percibido? Desde hace siglos, los filósofos han tratado de contestar estas preguntas fundamentales sobre el entendimiento humano, pero lejos de llegar a un consenso, han elaborado diversas doctrinas que se contradicen, entrelazan y oponen entre sí. Por un lado, los filósofos materialistas sostienen que existe una realidad objetiva, totalmente independiente de la mente, cuya percepción es una copia más o menos fiel de ella. Por otro

lado, para los filósofos idealistas, la realidad que percibimos es un producto de la mente y es en ella donde hay que buscar el origen del mundo percibido.

La posición más radical del idealismo es el solipsismo, que niega la posibilidad de conocer la realidad material y reduce toda percepción a la imaginación de uno mismo; si veo un libro en mis manos, es porque lo estoy imaginando; si una piedra me golpea y siento dolor, todo el proceso también es producto de mi imaginación. Por muy contrario que sea el solipsismo a nuestra intuición, no es evidente cómo refutar la tesis de que el mundo es un sueño individual.

Con el fin de elucidar el concepto de una realidad externa, Descartes se propuso construir un sistema filosófico basado en argumentos puramente racionales, sin recurrir a la cuestionable experiencia sensorial. Cansado de repetir las doctrinas antiguas y con un afán de empezar la filosofía desde cero, reflexionó sobre el mundo sin tomar nada por seguro desde un principio. Para empezar, constató que ni siquiera tenemos certeza de que nuestros sentidos no nos engañan; ¿acaso no tenemos el ejemplo de los sueños, que nos parecen reales mientras dormimos? Por lo tanto, para entender el mundo, conviene más analizar aquellas ideas que no dependen de experiencias sensoriales. En sus escritos,[31] Descartes primero cuestionó que existiera cualquier cosa, para, en un siguiente paso, constatar que pensaba, de donde concluyó que él (al menos) existía como sustancia pensante; hasta aquí todo mundo estaría de acuerdo con él. Luego también constató que podía moverse y cambiar de lugar, por lo que dedujo que la sustancia pensante está amarrada a una sustancia corporal. Si eso no es una ilusión, entonces no queda más que aceptar también la existencia de un mundo sensible fuera de uno; en esto también todos (o casi todos) estarían de acuerdo.

Siguió meditando Descartes: nosotros los humanos somos finitos y, sin embargo, podemos concebir algo infinito como Dios; de donde dedujo que la idea del infinito, que no

está basada en nuestra experiencia sensorial, nos tuvo que llegar de fuera, de un ser con ese atributo. Así llegó a la conclusión de que podemos estar seguros, por lo menos, de la existencia de Dios, pues de otra forma seres finitos como nosotros seríamos incapaces por cuenta propia de tener la idea de un Ser Infinito;[32] por lo tanto, debemos concluir que la idea de Dios fue colocada por Él en nuestra mente. Y si aceptamos este hecho también podemos aceptar que otras ideas estén implantadas en nuestra mente.

La existencia de ideas innatas es un punto medular en toda teoría del conocimiento. Además de la idea de Dios, Descartes vio en las matemáticas un buen ejemplo de ideas que nos sirven para percibir el mundo. Su argumento es:

> física, astronomía, medicina, y todas las otras ciencias que dependen de la consideración de objetos compuestos, son muy dudosas e inciertas; mientras que aritmética, geometría y otras ciencias de esta naturaleza que tratan sólo de cosas muy simples y generales, sin mucho preocuparse si están en la naturaleza o no, contienen algo cierto e indubitable. Ya que duerma yo o esté en vigilia, dos y tres siempre serán cinco y un cuadrado tendrá cuatro lados…[33]

Y el inventor de la geometría analítica llegó a la conclusión fundamental de que: “Percibimos los cuerpos mismos sólo por la facultad de entender que está en nosotros, y no por la imaginación o los sentidos.”[34] Es decir, poseemos ideas innatas, anteriores a la experiencia sensible, que nos permiten entender el mundo.

Más aún, Descartes distinguió dos clases de certezas:[35]

> La primera es la denominada moral, que es suficiente para regular nuestras costumbres, aunque sepamos que puede ser que, absolutamente hablando, sean falsas. Así, cuantos nunca han visitado Roma no ponen en duda que sea una villa de Italia, aun cuando podría acontecer que todos aquellos de quienes han aprendido esto, se hubieran equivocado.

Tenemos esta clase de certeza, dice Descartes, porque hace sentido; del mismo modo como, al adquirir sentido un texto en clave que logremos descifrar, nos convencemos de que lo hemos interpretado correctamente.

“La otra clase de certeza es la que tenemos cuando pensamos que no es en modo alguno posible que la cosa sea de otra forma a como lo juzgamos.” Por ejemplo, la certeza de que Dios es *la fuente de toda verdad*, así como las verdades matemáticas. Se trata de la certeza a la que llegamos por medio de la razón.

Descartes y los filósofos “racionalistas” desconfiaban del entendimiento basado en los sentidos si no iba acompañado de una teoría[36] que unificara las percepciones y les diera coherencia; confiaban más en las ideas *a priori*, aquellas que son anteriores a la comprobación en el mundo sensible. Ejemplos de tales ideas son las verdades matemáticas: éstas se demuestran recurriendo únicamente a la razón. Así, por ejemplo, podemos estar seguros de que el teorema de Pitágoras se aplica a todos los triángulos porque lo deducimos con la razón a partir de las ideas que tenemos de triángulo y cuadrado. De esta forma, según Descartes, la razón nos permite construir nuestro conocimiento del mundo externo, tal como deduce verdades matemáticas; en ese sentido, las matemáticas serían el paradigma de la ciencia y la razón, base confiable del conocimiento.

* * *

Por supuesto, no todos los filósofos estuvieron de acuerdo en que la razón puede alcanzar verdades profundas sin recurrir a la experiencia sensorial. La posición contraria, que se suele llamar empirismo y a la cual están asociados los nombres de Locke y Hume, sostiene que todo conocimiento humano se origina en la experiencia que adquirimos por medio de nuestros sentidos. Sabemos cómo es el mundo y lo comprendemos después de la experiencia sensorial, es decir: *a posteriori*. Por ejemplo, si sabemos que el Sol saldrá mañana, es porque siempre ha salido hasta ahora, de donde deducimos que es extremadamente probable que salga también mañana.

Locke, contemporáneo de Newton, afirmó categóricamente que no hay tal cosa como ideas innatas. Dedicó una buena parte de su *Ensayo sobre el entendimiento humano* a refutar su existencia, ya que, según él, la mente humana es una *tabula* rasa, algo así como un cuadro en blanco, sobre el cual se van pegando las experiencias sensoriales. Nuestra

percepción de la realidad es un producto de ellas y todos los conceptos básicos han sido forjados por la experiencia.

Medio siglo después, Hume llevó el empirismo al extremo: afirmó que todas las ideas son copias de las impresiones que recibimos del mundo externo y negó la existencia de verdades universales que se apliquen a todos los casos. Ya que es imposible comprobar empíricamente cada experiencia, cuando mucho podemos decir que la práctica nos enseña que en tal o cual situación suele suceder tal o cual cosa. Hume puso especial atención en el problema de la relación de causa con efecto; el hecho de que una causa produzca un efecto determinado es producto de la experiencia: sé que al soltar una piedra caerá al suelo y al meter la mano al fuego sentiré dolor; si espero tales efectos es porque a lo largo de mi vida he visto y comprobado que siempre ocurre así. Todo es cuestión, entonces, de costumbres adquiridas por la experiencia.

Una posición aún más radical es la del obispo irlandés George Berkeley, a quien se considera el principal representante del idealismo puro. Puesta en su contexto histórico, su filosofía es, en buena parte, una reacción contra las expectativas despertadas por los enormes éxitos de la mecánica newtoniana que describía con precisión el movimiento de la materia. Berkeley no sólo negó la existencia de ideas *a priori*, sino rechazó la posibilidad de conocer la materia. Si todo lo que sabemos del mundo exterior es por medio de sensaciones mentales, podemos prescindir de la materia como el sustrato de ellas y ver directamente a la experiencia como una producción de ideas en nuestra mente.

Se podría objetar que, de ser así, las cosas deberían desaparecer cuando nadie las mira, pero Berkeley argumentó que las ideas son colectivas pues están dadas por Dios. Estamos seguros de que existen otros seres semejantes a nosotros porque nos comunicamos con ellos, así como Dios se comunica con nosotros en el lenguaje de la naturaleza. Por ello, se debe distinguir entre las ideas que son producto de

la imaginación individual —como los sueños— y las percepciones más permanentes que "son impresas en los sentidos por el Autor de la naturaleza".

De todos modos, Berkeley no negó la existencia de la materia, pero hace una precisión al respecto.[37] Aclaró que por idea él entendía, no ficciones o fantasías de la mente, sino "objetos inmediatos del entendimiento, o cosas sensibles, que no pueden existir sin ser percibidas, o fuera de una mente". Por ejemplo, un árbol real

> *existe en* la mente infinita de Dios… el mismo ser de un árbol, o de cualquier otra cosa sensible, implica una mente en la cual esté… La disputa entre los materialistas y yo no es si las cosas tienen una existencia real fuera de la mente de esta o aquella persona, sino si tienen una existencia absoluta, distinta de la de ser percibidos por Dios, y exterior (distinta) a todas las mentes.

Así, el relato bíblico de la creación se refiere a cosas que empiezan a existir no "con respecto a Dios, sino a sus criaturas". Lo que rechaza Berkeley no es la existencia de las cosas materiales, sino la de un "*sustrato*, instrumento, ocasión o existencia absoluta" para ellas. El Dios de Berkeley parece ser más cercano al demiurgo del *Timeo* y al mundo de las Formas.

* * *

Situado entre las posiciones extremas del racionalismo y del empirismo, Immanuel Kant elaboró un vasto sistema filosófico que incorpora algunos principios básicos de cada una de estas doctrinas en una estructura mucho más coherente y elaborada. Su obra cubre numerosos campos de la filosofía, pero nuestro propósito es analizar sólo algunos aspectos específicos que se pueden relacionar con la física, como lo es su concepción del espacio y el tiempo, así como su interpretación de la realidad objetiva.

En su *Crítica de la razón pura*,[38] Kant se propone como meta elucidar el origen del conocimiento humano y determinar los verdaderos límites de la razón. Ese famoso tratado inicia con la frase: "*No hay duda de que todo nuestro conoci-*

miento comienza con la experiencia", pero unos renglones más abajo, su autor precisa:

> Si bien todo nuestro conocimiento comienza con la experiencia, de ningún modo se infiere que todo se origine de la experiencia. Por el contrario, es muy posible que nuestro conocimiento empírico sea una combinación de aquello que recibimos a través de nuestros sentidos, y aquello que la capacidad de cognición proporciona por sí misma (B 1).[39]

Así, el conocimiento tiene dos fuentes: la sensibilidad y el entendimiento: "A través de la primera, los objetos nos son dados; a través del segundo, son pensados" (A 15/ B 29).

Kant, al igual que los racionalistas, acepta la existencia de un conocimiento *a priori* que es anterior a cualquier experiencia. Pero, a diferencia de sus antecesores, no intenta demostrarlo con argumentos lógicos, sino que primero invierte el problema y se pregunta: ¿cómo reconocer si un concepto es *a priori*? La respuesta que ofrece es, en sí, una prueba de existencia: nuestro entendimiento se basa en ideas universalmente válidas y necesarias, y sin embargo universalidad y necesidad no se pueden comprobar con la experiencia de los sentidos. Eso, para Kant, es justamente la indicación de que se trata de conceptos *a priori*: si no vienen de la experiencia, deben estar en nuestra mente. Es decir, todos los conceptos que tengan validez universal y necesaria deben ser *a priori*.

Tomemos como ejemplo la idea de que "todo efecto tienen una causa". No es algo que se deduzca de la experiencia, ya que no se puede comprobar esa afirmación para todas y cada una de las causas y sus respectivos efectos que han existido, existen y existirán. Por el contrario, es la mente, provista de una idea *a priori*, la que busca una relación de causa a efecto en todo lo que percibe. Sin la idea *a priori* de esa relación, el mundo percibido sería incomprensible y sin sentido.

En general, Kant invirtió el problema de cómo percibimos y comprendemos el mundo, lo cual comparó, sin falsa modestia, con la revolución de Copérnico. El movimiento de los planetas parece complicado en extremo si suponemos que la Tierra está fija en el centro del Universo, pero se

vuelve comprensible si notamos que está en movimiento. En forma análoga: "si nuestro modo de percibir debe adaptarse a la constitución de los objetos, no… podemos saber nada de ellos *a priori*; pero… los objetos (como objetos de los sentidos)… deben conformarse a nuestra facultad de percibir (B XVII)". Es decir, hay que cambiar de punto de vista y reconocer que el mundo es como lo percibimos porque así lo estructura nuestra mente. "La mente humana es, por naturaleza, arquitectónica. Es decir, considera todo nuestro conocimiento como perteneciente a un posible sistema" (A 474/ B 502).

Lo anterior no quiere decir que el mundo sea una ilusión y Kant tiene mucho cuidado en deslindarse de la filosofía que él llamó *idealismo materialista*, porque supone que la materia es idea. En la sección "Refutación del idealismo" de la *CPR* identifica dos clases de idealismos: "teorías que declaran la existencia de objetos en el espacio fuera de nosotros ya sea dudosa e indemostrable, o falsa e imposible" (B 274). El primero es el idealismo de Descartes, para quien lo único seguro es "yo existo"; el segundo es el idealismo de Berkeley, quien sostiene que los objetos situados en el espacio y el tiempo son entidades imaginarias. Para Kant, es inevitable caer en esas posturas si insistimos en creer que el espacio y el tiempo son propiedades de la materia y no formas de percepción que nos permiten ordenar nuestras sensaciones para darles un sentido.

La refutación del idealismo materialista radica en el hecho de que la experiencia interna es imposible sin la experiencia del mundo externo (que Descartes, de todos modos, no negaba). Más específicamente, yo estoy consciente de mi propia experiencia porque percibo el paso del tiempo; sin el tiempo ni siquiera podría decir "yo pienso". Pero todos los cambios temporales son con respecto a algo permanente; de lo contrario no percibiría ningún cambio. La clave de la refutación está, entonces, en ese permanente: su percepción "sólo es posible por medio de una cosa fuera de mí", dice

Kant; por lo tanto, yo existo en el tiempo porque existen cosas reales fuera de mí.

Por supuesto, la mente puede a veces desvariar y producir sueños o alucinaciones, pero se trata de casos individuales de percepción que reproducen experiencias vividas anteriormente, con objetos que alguna vez fueron reales. "La experiencia interna es posible en general sólo a través de la experiencia externa en general", escribe Kant.

Espacio y tiempo

Así, sin negar la existencia de un mundo independiente del sujeto, Kant puso énfasis en la diferencia entre la apariencia y aquello que la produce:

> Todo lo que se intuye en el espacio y el tiempo, y por lo tanto todos los objetos de cualquier experiencia posible para nosotros, son sólo apariencias, es decir, meras representaciones que, en la forma en que son representados, como existencias extendidas, o como series de alteraciones, no tienen existencia independiente fuera de nuestros pensamientos (A 491/B 519).

Para explicar cómo se producen las apariencias, Kant recurrió a una concepción original del espacio y del tiempo, no como propiedades de las cosas, sino como parte esencial de la estructura que nos permite entender el mundo.

El mundo no tendría sentido si no tuviésemos una representación del espacio en el cual situar todos los objetos percibidos. A partir de esta constatación, Kant llegó a la conclusión de que el espacio no es algo inherente al mundo en sí, sino a nuestro modo de percibirlo. Si veo una silla aquí o una montaña allá, es gracias a que mi mente posee una forma de percepción que me permite situar los objetos fuera de mí y formar una imagen coherente de lo que veo. De no ser así, mi experiencia del mundo sería un conjunto abigarrado de sensaciones. La tesis revolucionaria de Kant consistió en voltear el problema: en lugar de buscar el espacio en el mundo, propuso buscarlo en nuestra forma de ver el mundo, como una "forma de percepción".

Algo enteramente análogo se puede decir del tiempo: si percibo el mundo tal como es, cambiando continuamente, es gracias a que el tiempo existe en mi aparato de percepción. El tiempo, nos dice Kant, no es algo empírico que se pueda deducir de la experiencia. Por el contrario: "Sólo con la presuposición del tiempo podemos representarnos las cosas existiendo todas al mismo tiempo (simultaneidad) o en tiempos distintos (sucesivamente)" (A 30/ B 46). El tiempo es una forma de percepción que nos permite ordenar nuestras experiencias sensoriales y darles un sentido, así como estructurar los pensamientos; el tiempo "...no es más que la forma del sentido interno, es decir, de la intuición de uno mismo y de nuestro estado interno".

De hecho, según Kant, espacio y tiempo son las dos formas de percepción que permiten percibir, en forma coherente, el mundo exterior e interno respectivamente. Que un cuerpo ocupe un lugar en el espacio no es algo que se pueda demostrar; por el contrario, percibimos un cuerpo porque nuestra mente lo sitúa en el espacio. Lo mismo puede decirse del tiempo: el hecho de que todo acontecimiento tiene una causa que lo antecede no es demostrable; más bien, es gracias al tiempo que podemos percibir una sucesión de causa y efecto. Nuestras sensaciones se producen en el espacio y el tiempo, condiciones necesarias para toda experiencia sensorial; fuera de ellos no puede concebirse ninguna experiencia.

Cosas en sí

Kant llamó su doctrina "idealismo trascendental", y lo distinguió enfáticamente del idealismo puro que niega, o al menos duda, de la existencia de un mundo externo independiente del sujeto. No puso en duda "la realidad de los objetos de intuición externa, como intuidos en el espacio, y de todo cambio, como representado en los sentidos internos",

pero “Este espacio y este tiempo, y con ellos todas las apariencias, no son cosas en sí; son sólo representaciones, y no pueden existir fuera de nuestra mente” (A 492/ B 520).

El espacio y el tiempo, entonces, son “condiciones de la existencia de cosas como apariencias (B XXV)”. Ahora bien, ¿cómo se origina todo aquello que percibimos a través del espacio y el tiempo? Kant postuló la existencia de cosas inaccesibles directamente a los sentidos, a las que llamó cosas en sí, que forman parte de una realidad que existe independientemente de la conciencia. Las cosas en sí producen las apariencias en nuestra mente, la cual reconstruye la realidad gracias a sus formas de percepción.

> No podemos tener conocimiento de ningún objeto como una cosa en sí, sino sólo en la medida en que es un objeto de intuición sensible, es decir, una apariencia... no podemos *conocer* los objetos como cosas en sí, pero podemos estar en posibilidad al menos de *pensarlos* como cosas en sí; de otra forma terminaríamos con la conclusión absurda de que pueden haber apariencias sin nada que aparezca (B XXVI).

Así, Kant distingue entre las cosas como “objetos de experiencia” o cosas para mí (fenómenos) y las “cosas en sí” (númenos); los primeros se manifiestan en el espacio y el tiempo, teniendo su origen en los segundos, que son independientes del sujeto.

* * *

La existencia de ideas innatas que nos permiten entender el mundo se puede poner en términos cercanos a nuestra experiencia moderna. Siguiendo el lenguaje de la computación, si comparamos el cerebro con una computadora, podemos decir que nuestra mente posee un *software* o un *sistema operativo* que le permite procesar la información proporcionada por los sentidos, para así ordenar y dar coherencia a las experiencias sensoriales. El problema, entonces, es saber de dónde viene ese software. ¿Nacemos con él o se desarrolla con la experiencia? ¿Es un software *a priori* o *a posteriori*?

Kant, al igual que Descartes, acepta que nacemos con un software ya integrado a nuestra mente, pero postula, además, que el espacio y el tiempo forman parte de él, no del mundo, y que nuestras percepciones son una combinación tanto de lo que producen las cosas en sí como de lo que aporta ese software.

Como mostraremos en los siguientes capítulos, estas ideas no son incompatibles con la física cuántica, al menos con la versión consagrada por la interpretación de Copenhague. De hecho, esta interpretación está inspirada en buena parte en la teoría del conocimiento que desarrolló Kant.

[31] En el *Discurso del método, Los principios de la filosofía* y las *Meditaciones metafísicas.*

[32] No olvidemos, sin embargo, que el Dios de los filósofos no es el Dios de Abraham, Isaac y Jacob, como lo señaló Pascal muy apropiadamente.

[33] Descartes, *Meditaciones metafísicas,* Primera meditación, 1642.

[34] *Ibid.*, Segunda meditación.

[35] *Los principios de la filosofía,* Parte iv.

[36] Véase por ejemplo, D. M. Clarke, *La filosofía de la ciencia de Descartes,* Alianza Editorial, Madrid, 1982.

[37] En *Tres diálogos entre Hilas y Filonús,* Espasa-Calpe, Buenos Aires, 1952.

[38] I. Kant, *Crítica de la razón pura,* 1781 y 1787; en adelante abreviado como CPR.

[39] Sigo la “notación académica” para enumerar los pasajes de la *CPR.*

VI. Espacio, tiempo y gravitación

Éstos son mis principios, y si no le gustan… bueno, tengo otros.

Groucho Marx

Nuestros conceptos de espacio y de tiempo cambiaron radicalmente a partir de 1905. Ese año, Albert Einstein publicó su famoso artículo “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento” que dio nacimiento a la teoría de la relatividad. El propósito original de Einstein era resolver la aparente contradicción entre el electromagnetismo de Maxwell y la relatividad de Galileo.

El principio de relatividad en la física clásica fue planteado por Galileo para explicar por qué la rotación de la Tierra y su movimiento alrededor del Sol no son perceptibles, si en verdad nuestro planeta no se encuentra inmóvil en el centro del Universo. Galileo hizo notar correctamente que es imposible detectar el movimiento uniforme: en un barco, carruaje o cualquier vehículo que se mueva con la misma velocidad y en línea recta, los pasajeros no pueden percibir ningún movimiento; de ello se percatan sólo cuando su vehículo se enfrena, acelera o gira.[40]

Un sistema de referencia puede ser tan válido como otro. De acuerdo con el “principio de relatividad de Galileo”, las leyes de la física son las mismas en cualquier sistema de referencia cuyo movimiento sea uniforme; escoger el más apropiado es cuestión de conveniencia. Para la mayoría de nuestros fines prácticos, nos conviene utilizar a la Tierra como sistema de referencia, aunque se mueva por el espacio. En cambio, para describir el movimiento de los planetas es más conveniente el Sol, ya que, con respecto a él, los planetas se comportan en forma regular; en cambio, con respecto a la Tierra, tienen trayectorias complicadas.

Si un vehículo se enfrena, acelera o gira, aparecen para sus pasajeros unas fuerzas que lo empujan hacia adelante, atrás o a un lado del vehículo. Se trata de fuerzas ficticias que se deben únicamente al hecho de que los cuerpos den-

tro del vehículo tienden a seguir en movimiento rectilíneo y uniforme; tales fuerzas se llaman inerciales. Un sistema de referencia que se mueve en línea recta y sin cambiar su velocidad se llama *sistema inercial*.

Con su teoría especial, Einstein extendió el principio de relatividad de Galileo a los fenómenos electromagnéticos y, en particular, al movimiento de la luz, cuya velocidad es la misma en cualquier sistema de referencia. Más adelante, con la relatividad general, amplió la teoría para incluir sistemas no inerciales, relacionando los efectos inerciales con la gravitación. La idea básica, sin embargo, es siempre la misma: las leyes de la física no deben depender del sistema de referencia que se escoja.

Relatividad especial

Mencionamos en el capítulo III cómo surgió el concepto fundamental de campo en el marco de la teoría de Maxwell. Al expresar las leyes básicas de los fenómenos eléctricos y magnéticos en forma de ecuaciones, Maxwell logró sistematizar estos fenómenos en forma equivalente a como Newton lo hizo para la gravitación. Además, como un importante corolario de su teoría, Maxwell demostró rigurosamente que la luz es una onda electromagnética que se propaga en el espacio.

El concepto de onda nos remite siempre a un medio que vibra: el sonido es una onda en el aire, las olas son ondas en el agua… ¿qué es lo que vibra para transportar una onda electromagnética? En la época de Maxwell, los físicos no tuvieron más remedio que recurrir —¡una vez más!— al famoso Éter, esa sustancia inmaterial que llena todo el Universo. Ahora el Éter habría de servir de sustento, ya no a la fuerza de gravedad como se pensaba en tiempos de Newton, sino a la electricidad y al magnetismo, y, en particular, a la luz como onda electromagnética.

La existencia hipotética del Éter está relacionada con un problema importante de la teoría de Maxwell: el hecho de que sus ecuaciones son incompatibles con el principio de relatividad de Galileo. Al pasar de un sistema de referencia a otro, resulta que las ecuaciones de Maxwell cambian de forma, lo cual implica que éstas sólo son válidas en un sistema de referencia particular y no en cualquiera. Pero esta situación no inquietó demasiado a los contemporáneos de Maxwell; después de todo, si se invoca al Éter cósmico, éste define un sistema privilegiado por excelencia. En cierta forma, es tranquilizante saber que existe algo inmutable en el Universo, un sistema absoluto al cual referir todos los fenómenos y las leyes matemáticas que los describen.

Por supuesto, todo lo anterior implicaba la posibilidad de realizar experimentos físicos para determinar si la Tierra está en movimiento con respecto a ese sistema absoluto. La manera más simple de comprobarlo sería medir la velocidad de la luz: si ésta tiene un cierto valor con respecto al Éter fijo, su velocidad debería ser distinta en otro sistema de referencia que se mueva con respecto a él. El famoso experimento del interferómetro de Michelson y Morley, realizado en 1887, estaba diseñado justamente para detectar cambios en la velocidad de la luz debido al movimiento de la Tierra en su órbita alrededor del Sol. Sin entrar en los detalles de este experimento clásico, basta señalar que su esquema consistía en comparar dos haces de luz dirigidos en dos direcciones perpendiculares y reflejados con un juego de espejos y prismas; una pequeña diferencia de velocidad se manifestaría en la interferencia entre las dos ondas luminosas. Dado que la Tierra se mueve en su órbita alrededor del Sol a una velocidad de unos 30 kilómetros por segundo, se esperaría una diferencia de ese orden entre dos haces perpendiculares entre sí, lo cual era factible de medir con la precisión del interferómetro. Como es bien sabido, el resultado encontrado fue totalmente negativo: la velocidad de la luz parecía ser la misma sin importar la dirección de su movi-

miento, es decir, no se notaba la velocidad de la Tierra con respecto al hipotético Éter.

Hubo varios intentos por explicar el resultado negativo de Michelson y Morley, pero ninguno fue exitoso hasta Einstein. Mientras se encontraba una explicación física, H. A. Lorentz y H. Poincaré, independientemente, se propusieron estudiar a fondo la estructura matemática de las ecuaciones de Maxwell y elucidar la razón por la que se violaba el principio de relatividad de Galileo. En particular, si esas ecuaciones cambian de forma al hacer una transformación de coordenadas que describe el paso de un sistema de referencia a otro, entonces se propusieron determinar cómo sería una transformación de coordenadas más general que no altere la forma de esas mismas ecuaciones. Lorentz encontró que efectivamente existe una transformación de coordenadas con esa propiedad, pero tiene la peculiaridad de mezclar tanto el espacio como el tiempo, como si el tiempo fuese una cuarta coordenada. Para el físico holandés, su resultado tenía sólo un interés académico. Poincaré llegó a un resultado similar, pero más general, y quizás si hubiera tenido más tiempo, hubiese encontrado el significado físico de sus resultados. Fue a Einstein a quien correspondió el gran mérito de encontrar el verdadero sentido de las transformaciones de Lorentz y mostrar que no son una simple curiosidad matemática.

* * *

La teoría que Einstein presentó en 1905 extendió el concepto de relatividad a la electrodinámica misma. A diferencia de la relatividad de Galileo, que sólo incluye cambios de coordenadas espaciales, la nueva teoría tomó en cuenta al tiempo como una cuarta coordenada en un espacio de cuatro dimensiones. Su postulado básico es que todas las leyes de la física son invariantes al pasar de un sistema a otro. La consecuencia más inmediata de este principio es que la ve-

locidad de la luz debe ser la misma para cualquier observador, independientemente de su movimiento: después de todo, esto es lo que indica el experimento de Michelson y Morley.

Lo anterior parece contradecir el concepto de velocidad que aprendemos en la escuela; el sentido común nos dice que al correr detrás de una señal luminosa, deberíamos verla con menor velocidad. Sin embargo, las velocidades no se suman o restan en la teoría de la relatividad sino que obedecen una fórmula más complicada,[41] que toma en cuenta el hecho de que el tiempo se contrae al pasar de un sistema de referencia a otro, de tal forma que la velocidad de la luz permanece siempre la misma.

Ningún experimento permite privilegiar un sistema inercial sobre otros. Esto incluye a los fenómenos electromagnéticos —en especial la luz— que, hasta la aparición de la teoría de Einstein, parecían escapar a esta ley fundamental. Al no haber un sistema de referencia privilegiado, el Éter volvió a caer en el olvido.

En la teoría de la relatividad no existe un tiempo absoluto, sino lapsos de tiempo que dependen de cada observador. Einstein mostró que existe una conexión básica entre espacio y tiempo, de modo tal que un intervalo de tiempo o una sección de espacio varían según el observador, y la duración de los procesos depende del sistema de referencia desde el cual se observan. Así por ejemplo, el tiempo transcurrido en una nave espacial que viaje a una velocidad muy cercana a la de la luz sería notablemente menor que el medido por los que se quedan en la Tierra: los viajeros pueden regresar y encontrarse a sus hijos o nietos más viejos que ellos mismos.

Es importante señalar, sin embargo, que el "tiempo propio" es un concepto perfectamente bien definido en la teoría de la relatividad: es el tiempo medido por un reloj en movimiento, sin importar cómo se mueva. Cada sistema físico tiene su tiempo propio, el cual está relacionado con los fe-

nómenos físicos que se producen en él. Lo relativo es la medición del tiempo en diferentes sistemas de referencia.[42] En el ejemplo de la hipotética nave espacial, el tiempo que transcurre para los tripulantes, el que miden y perciben, es su "tiempo propio", tan real como el "tiempo propio" transcurrido para los que se quedaron en la Tierra; la teoría de la relatividad implica que los dos tiempos propios no son iguales entre sí, pero permite calcular exactamente la relación entre los dos.

El efecto de la contracción del tiempo se ha comprobado perfectamente en forma experimental. Por ejemplo, partículas subatómicas que se generan en los grandes aceleradores de partículas y se mueven con velocidades cercanas a la luminosa, se desintegran en billonésimas de segundo —su tiempo propio— en sus propios sistemas de referencia, pero sobreviven muchísimo más en el sistema de referencia del laboratorio. Asimismo, la contracción del tiempo se ha confirmado para velocidades más mundanas. Gracias a los instrumentos extremadamente precisos para medir el tiempo, los efectos relativistas se ponen de manifiesto cada vez más claramente y más allá de cualquier duda. Tan es así que el Sistema de Posicionamiento Global, que determina la posición sobre la superficie terrestre midiendo el tiempo que tarda una señal de radio en viajar de un satélite a un emisor, requiere de una precisión de pocos nanosegundos para establecer esa distancia; para ello se tiene que tomar en cuenta necesariamente los efectos de la contracción relativista del tiempo.

En síntesis, la teoría de la relatividad ha revelado una estrecha relación entre espacio y tiempo. En principio, el concepto del tiempo como una cuarta dimensión no debería ser nada extraordinario: después de todo, para describir un suceso que ocurre en cierto lugar y en cierto momento, necesitamos de tres coordenadas espaciales que nos indican la posición espacial y, además, el tiempo en el que ocurre, el cual se puede interpretar como una cuarta coordenada. En

la física newtoniana, esta interpretación del tiempo no tiene mayores consecuencias porque las coordenadas espaciales nunca se mezclan con la temporal. En cambio, en la teoría de la relatividad están unidas forzosamente.

La teoría de la relatividad también tiene importantes consecuencias dinámicas, ya que permite interpretar la masa y la energía en una forma totalmente novedosa. La famosa fórmula de Einstein que relaciona energía con masa tiene la siguiente forma general para un objeto masivo en movimiento:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}},$$

donde v es la velocidad del objeto y m su "masa inercial". Por definición, ésta es la masa en un sistema en el que el objeto está en reposo (que es la manera más cómoda de medirla). Una consecuencia de esta fórmula es que un cuerpo en reposo también posee energía en forma de masa, pero el hecho de que ésta se pueda transformar en energía depende, en la práctica, de condiciones muy especiales. Cuando Einstein publicó su trabajo, no era evidente cómo lograr esa conversión; se habría de volver realidad tres décadas después, con el descubrimiento de las reacciones nucleares. Lo que sí se ve directamente de esta fórmula es que un cuerpo masivo nunca puede alcanzar la velocidad de la luz porque, para ello, requeriría de una cantidad infinita de energía. Sólo una partícula sin masa, como el fotón, puede moverse a esa velocidad límite; de hecho, el fotón es una partícula de energía pura.

La existencia de un límite de velocidad en la naturaleza no tiene equivalente en la mecánica clásica. Revela una estructura geométrica propia de la relatividad: el espacio-tiempo de cuatro dimensiones, propuesto por Herman Minkowski (1864-1909).

Cada punto en el espacio de Minkowski es un suceso, descrito por tres coordenadas espaciales y una temporal. Además, el concepto de distancia se generaliza al de "seudodistancia" por medio de una extensión del teorema de Pitágoras a cuatro dimensiones. Específicamente, la seudodistancia entre dos sucesos, descritos por coordenadas (t, x, y, z) y ($t + dt$, $x + dx$, $y + dy$, $z + dz$) está dada por la fórmula

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2,$$

que recuerda el teorema de Pitágoras, excepto por el hecho muy importante de que el "cuadrado de la hipotenusa" puede tomar valores tanto positivos *como* negativos debido al signo negativo que aparece delante del "cateto del tiempo", dt. En particular, resulta que la seudodistancia entre dos sucesos unidos por una trayectoria luminosa es igual a cero.

Desde el punto de vista físico, el movimiento de una partícula corresponde a una curva en el espacio de Minkowski. Más aún, la seudolongitud de esa curva, calculada de acuerdo con la fórmula para la seudodistancia, es el tiempo propio medido en el reloj propio de esa partícula (figura VI.1). Si se trata de un fotón, su trayectoria en el espacio de Minkowski es una recta a 45 grados, y la seudolongitud de esa trayectoria, medida entre cualquier par de puntos sobre ella, es siempre cero. Se puede decir que, para fotones y cualquier partícula que se mueva a la velocidad de la luz, el tiempo se contrae infinitamente y deja, por lo tanto, de transcurrir; la luz recorre cualquier distancia, incluso el Universo entero, en lo que para ella es estrictamente un instante: un intervalo de tiempo cero.

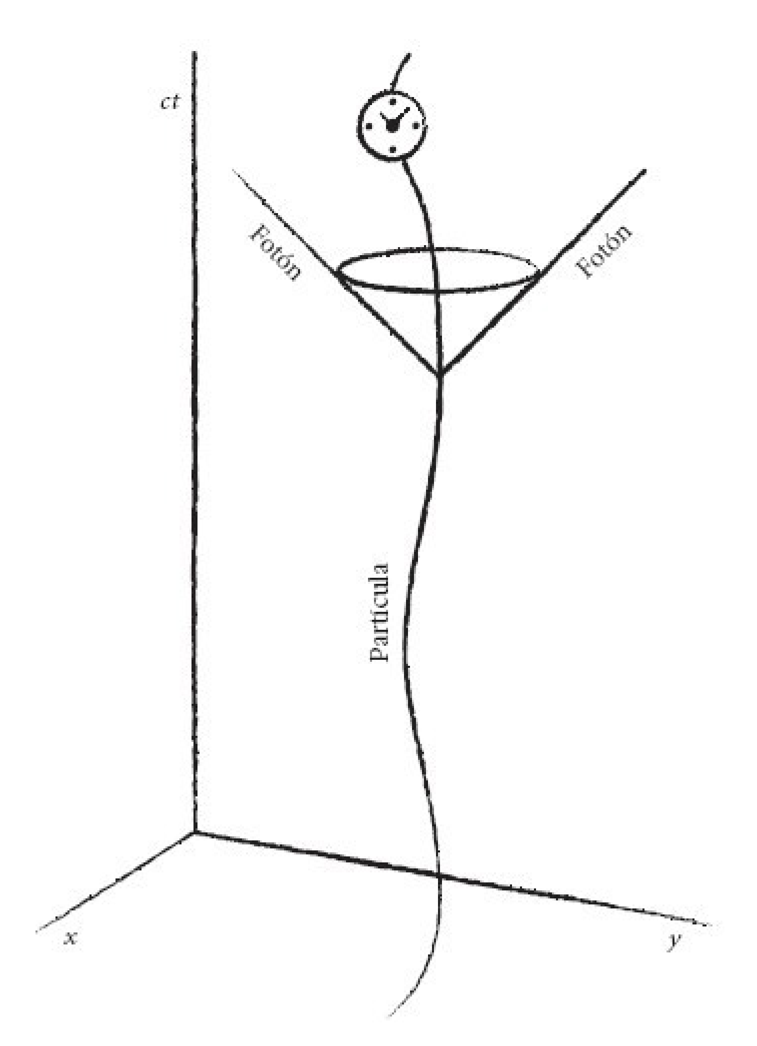


Figura VI.1

Veamos con un poco más de detalles la estructura del espacio-tiempo de Minkowski. Debido al límite natural que es la velocidad luminosa, un suceso S sólo puede influir sobre aquellos sucesos a los cuales se puede llegar desde S con una velocidad menor o cuando mucho igual a la de la luz. Para cada suceso S, existe un conjunto de sucesos que se encuentran en su futuro causal, es decir, sucesos sobre los cuales S puede influir, es decir, puede haber una relación de causa a efecto; asimismo, existe un conjunto de sucesos que pudieron influir sobre S (véase la figura VI.2); el primer con-

junto es el futuro causal de S y el segundo es su pasado causal. Tanto el futuro como el pasado causales se encuentran dentro de lo que se conocen como *conos de luz*. El cono de luz futuro es el conjunto de todas las líneas de universo de los fotones emanados de S, y el cono de luz pasado es el conjunto de todas las líneas de universo de los fotones recibidos en S. Fuera de esos conos existe una región del espacio-tiempo que es causalmente inaccesible a S.

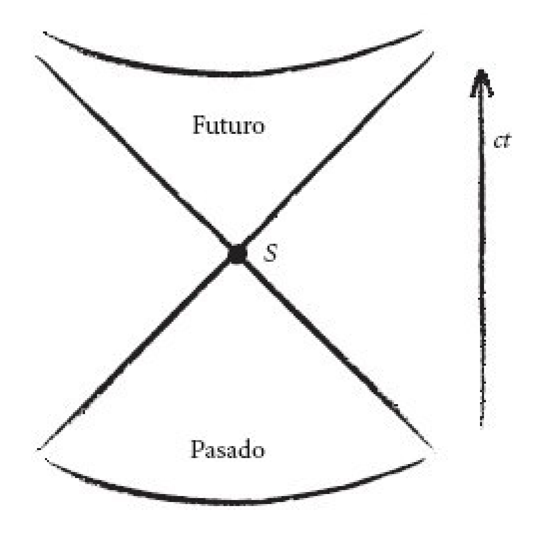


Figura VI.2

Es importante notar que el tiempo puede contraerse o extenderse según cada observador, pero no puede ocurrir una inversión del sentido del tiempo entre dos sucesos conectados causalmente. Si el suceso B está dentro del cono futuro del suceso A, entonces A antecede a B y así se verá desde cualquier sistema de referencia. La duración temporal puede cambiar, pero el orden temporal es invariante al pasar de un sistema de referencia a otro (figura VI.3a). Si se emite una partícula desde un cierto emisor, y la misma es recibida en otro lugar distante por un receptor, los dos sucesos —emisión y recepción— siguen un orden causal, porque cualquiera que observe tal proceso verá primero la emisión de la partícula y *después* su recepción.

Sin embargo, cuando se trata de sucesos no unidos causalmente, el orden temporal deja de tener sentido, ya que depende del sistema de referencia que se utilice. Si el suceso C está fuera del cono de luz de A, entonces C se verá antes o después de A según desde qué punto del espacio-tiempo se observa (véase la figura VI.3b). El orden temporal entre causa y efecto no tiene un sentido invariante para sucesos causalmente desconectados.

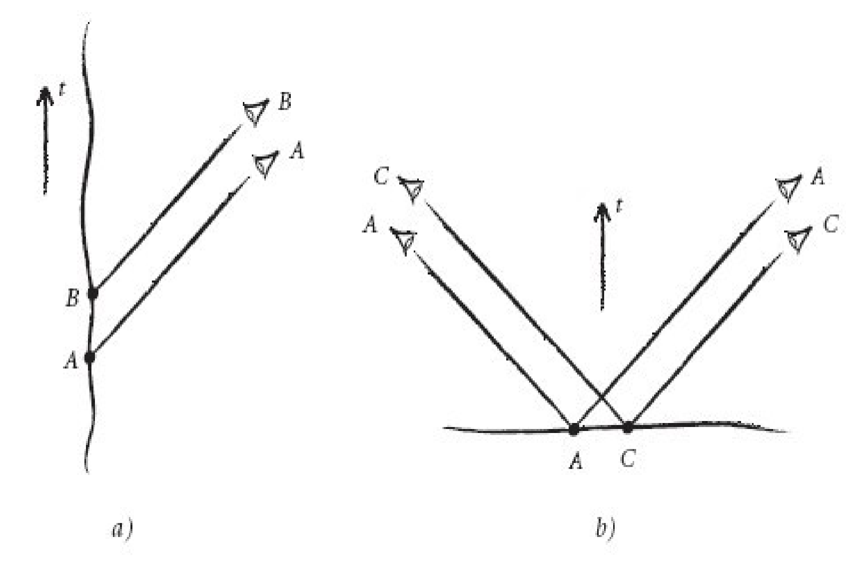


Figura VI.3

A pesar de lo espectacular que es la relatividad del tiempo predicha por la relatividad de Einstein, esta teoría, al igual que la física newtoniana, no explica por qué el tiempo fluye en una sola dirección. Si uno cambia el sentido del tiempo, las leyes de la física se mantienen iguales, tanto en la mecánica newtoniana como en la einsteiniana. Por eso, en ese aspecto quizás es más fundamental la interpretación de Boltzmann que mencionamos en el capítulo IV, que pone el énfasis en la manifestación estadística de los procesos microscópicos.

* * *

La luz es velocísima para todo fin práctico en la Tierra, pero demasiado lenta para recorrer el Universo. Baste recordar que la luz tarda unos siete minutos en llegar del Sol a la Tierra y cuatro años desde la siguiente estrella más cercana, cien mil años en cruzar la galaxia, unos dos millones de años en llegar desde la galaxia más cercana y más de diez mil millones de años en atravesar el universo visible. Las posibilidades de comunicarnos con hipotéticos seres extraterrestres son enormemente limitadas… a menos que existieran partículas más rápidas que la luz, o "atajos" para desplazarse por el espacio-tiempo. De estas posibilidades nos ocuparemos a continuación.

Taquiones

Como mencionamos, la teoría de la relatividad predice que ningún cuerpo material puede alcanzar la velocidad de la luz porque necesitaría para ello una cantidad infinita de energía. Pero, por otra parte, no hay una razón fundamental por la que no puedan existir partículas que *siempre* sean más veloces que la luz. En principio, la velocidad de la luz podría ser una barrera en dos sentidos: así como las partículas comunes no pueden rebasarla, podría haber algún tipo de partícula que nunca puede disminuir su velocidad por debajo de la luminosa. Estas hipotéticas partículas, aún sin descubrir, recibieron el nombre de *taquiones*, palabra que viene del griego *tajos*: velocidad.

Si bien la teoría de la relatividad no excluye la existencia de partículas más veloces que la luz, implica, sin embargo, que para ellas no existe una distinción entre pasado y futuro. Debido a la peculiar geometría del espacio-tiempo, rebasar la velocidad de la luz es enteramente equivalente a invertir el sentido del tiempo, lo cual permitiría comunicarse con el pasado e, incluso, construir una máquina del tiempo tal como en las películas de ciencia ficción.

Sea lo que fuere, de existir los taquiones serían del todo distintos de las partículas que forman la materia común. En particular, su masa no se presta a una definición en el sentido usual. Al respecto, hay que notar que la masa de una partícula elemental no se puede medir directamente, sino que se deduce indirectamente a partir de su energía y velocidad. Para los taquiones se puede definir la energía sin ambigüedades, pero a costa de que su masa sea una cantidad *imaginaria*, en el sentido que dan los matemáticos a este término: el cuadrado de la masa de un taquión es una cantidad negativa. Sería más correcto, sin embargo, decir que el concepto común de masa no se aplica a partículas más rápidas que la luz, aunque sí se puede extender a ellas los conceptos de energía y velocidad.

Si bien es factible, en principio, detectar algo semejante a un taquión en un laboratorio, hasta la fecha no se ha encontrado ninguna evidencia de su existencia. Al respecto, recordemos que la mayoría de las partículas elementales se detectan por las reacciones que ocurren entre ellas y que provocan transformaciones de unas en otras (por ejemplo, un neutrón aislado se transforma espontáneamente en un protón, un electrón y un neutrino). Si alguna reacción produce, además de partículas comunes, un taquión, la presencia de éste se podría detectar midiendo la energía y la velocidad de las otras partículas producidas por esa reacción. También una partícula que se mueve más rápido que la luz debería producir cierto tipo de radiación electromagnética que delataría su presencia. Con lo anterior en mente, se han propuesto y efectuado varios experimentos, pero los resultados siempre han sido negativos.

Por otra parte, los taquiones, de existir, implicarían varias situaciones de lo más paradójicas, particularmente con relación a la posibilidad de comunicarse con el pasado. Como señalamos más arriba, el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de una señal, visto por algún observador, depende de cómo se mueve éste. Para una partícula común

no es posible invertir el orden temporal entre emisión y recepción, pero sí para un taquión: si un observador en la Tierra ve un taquión emitido desde su planeta y recibido en Marte, un marciano verá el mismo proceso al revés: para él el mismo taquión saldrá de Marte y llegara después a la Tierra.

Más precisamente, se puede demostrar que si se dispone de un emisor y detector de taquiones, se podría mandar señales al pasado ajustando apropiadamente la velocidad relativa entre observadores.[43] Aunque las leyes de la física no lo prohíban, se crearían muchas situaciones paradójicas: por ejemplo, ¿qué pasaría si uno se comunica consigo mismo de niño y le cuenta su vida posterior?; ¿y si uno se encuentra a sí mismo de niño y "se" asesina? Si queremos evitar situaciones paradójicas, debemos suponer que no existe medio de comunicación más rápido que la luz, pero eso será por motivos más lógicos que físicos.

Volveremos al tema del tiempo circular en el capítulo X, no sin antes, en los siguientes capítulos, presentar argumentos para sostener que el tiempo, y en particular su dirección, tiene otra realidad en el nivel atómico. Como mencionamos en el capítulo anterior, el tiempo de la física moderna es más bien una propiedad estadística de los objetos y seres macroscópicos como nosotros, hechos de billones de billones de moléculas; sólo podemos afirmar que es extremadamente más probable (¡pero no absolutamente imposible!) que el tiempo transcurra en una dirección y no en otra.

Relatividad general

Después de presentar la teoría de la relatividad, Einstein pasó cerca de una década cavilando sobre cómo tomar en cuenta efectos no inerciales. Finalmente, en 1916, presentó una versión más general de su teoría que incluye también el fenómeno de la gravedad en una forma totalmente novedo-

sa. La idea básica de la teoría generalizada de la relatividad es que el espacio-tiempo es un espacio de Riemann, es decir, un espacio curvo de cuatro dimensiones. Lo que percibimos como fuerza de gravedad es una manifestación de esa curvatura: la gravitación es una propiedad geométrica del espacio-tiempo.

Se suele ilustrar esta idea con el ejemplo de una canica que rueda sobre una superficie; si ésta es plana, la canica se moverá en línea recta, en cambio seguirá una trayectoria curva sobre una superficie deformada. Del mismo modo, se puede decir que los planetas giran alrededor del Sol porque este astro deforma el espacio-tiempo a su alrededor y los planetas se mueven siguiendo esa curvatura. La diferencia fundamental con el ejemplo de la canica es que la gravedad actúa sobre un espacio-tiempo de cuatro dimensiones: tanto el espacio como el tiempo se deforman. En la práctica, la curvatura debida a una estrella común o un planeta es casi imperceptible, pero se manifiesta en toda su plenitud cerca de objetos muy densos como los hoyos negros o a muy gran escala en el Universo en su conjunto. Pero, en una muy buena aproximación, el espacio-tiempo en la Tierra, en el Sistema Solar y, en general, en casi todo el espacio cósmico, es prácticamente plano.

Donde hay atracción gravitatoria, no existen las rectas: un rayo de luz sigue una trayectoria curva. En la teoría de Einstein, el espacio-tiempo es riemanniano y, en ausencia de cuerpos masivos, se reduce al espacio de Minkowski, que es un espacio plano. La fórmula para medir seudodistancias es la que vimos al final del capítulo III: el tensor métrico g_{ij} está enteramente determinado por la distribución de materia y energía en el espacio.

En la teoría general, la geometría es física: el espacio ya no es un simple escenario de los fenómenos físicos, sino que posee propiedades dinámicas. Riemann se habría sentido muy satisfecho de ver cómo el mundo matemático que des-

cubrió y exploró encontró una correspondencia en el mundo físico.

Hoyos negros

Si bien la curvatura del espacio-tiempo es muy difícil de detectar en la Tierra y en el Sistema Solar, puede manifestarse en toda su magnitud alrededor de grandes concentraciones de masa. El caso más espectacular es el de los llamados hoyos negros, que producen una deformación extrema del espacio y del tiempo en una forma que sólo la relatividad general puede describir.

La historia empezó pocos meses después de la publicación del artículo de Einstein de 1916, cuando el astrónomo Karl Schwarzschild encontró una solución de las ecuaciones de la teoría relativista que describe el campo gravitatorio —equivalentemente: el espacio-tiempo— generado por una distribución esférica de masa. La solución de Schwarzschild está determinada enteramente por un solo parámetro, la masa, y corresponde a la generalización relativista de lo que sería, en la física newtoniana, el campo gravitatorio de una esfera masiva como el Sol o un planeta.

Una peculiaridad del espacio-tiempo de Schwarzschild es que si un objeto tiene cierta masa concentrada en un radio inferior a lo que se conoce como radio de Schwarzschild —unos 3 km por cada masa solar—,[44] entonces la gravedad es tan extrema que nada, ni siquiera la luz, se puede escapar de él. En lenguaje geométrico, el espacio-tiempo se curva a tal grado que se cierra sobre sí mismo; en cuanto al radio de Schwarzschild, corresponde al de una superficie esférica, el "horizonte de eventos", el cual sólo se puede cruzar en una dirección: de afuera hacia adentro. El interior del horizonte de eventos está causalmente desconectado del resto del Universo: nada que suceda ahí puede influir sobre el exterior y

un hipotético navegante espacial que entre a un hoyo negro jamás podrá escapar de él ni enviar mensajes al exterior.

Sin entrar en los detalles de la formación de los hoyos negros, mencionaremos que existen diversas evidencias astronómicas de la existencia de tales objetos en el Universo que se revelan por la atracción gravitatoria ejercida a su alrededor, al absorber la materia de otras estrellas cercanas. En cuanto a su origen, los astrofísicos piensan que se forman por el colapso gravitacional de las estrellas muy masivas, después de que hayan agotado su combustible nuclear y se apaguen; otra posibilidad es que se hayan formado hoyos negros gigantescos en épocas muy remotas del Universo y que, en la actualidad, éstos se encuentren en los núcleos de las galaxias.[45]

Por lo que se refiere al tiempo, los hoyos negros presentan el caso más extremo de su relatividad. Si se observa cómo un cierto objeto cae hacia el horizonte, el tiempo de ese objeto parecerá congelarse visto desde lejos; en cambio, en el objeto mismo transcurrirá normalmente. Visto a distancia, la llegada al radio de Schwarzschild tomará un tiempo infinito; en cambio, el viajero que penetra al hoyo no notará, en su propio sistema de referencia, nada particular y el tiempo seguirá transcurriendo para él normalmente aun después de haber cruzado el fatídico horizonte de eventos.

Poco después de la publicación del trabajo Schwarzschild, los físicos teóricos Reissner y Nordstrom encontraron una generalización de la solución de Schwarzschild que incluye también una carga eléctrica. Luego, pasaron varias décadas hasta que, en 1963, R. P. Kerr encontró otra solución de las ecuaciones de Einstein que describe un hoyo negro rotante y con masa; esta misma solución fue generalizada poco después por E. T. Newman y colaboradores al incluir también una carga.

Lo que se conoce actualmente como solución de Kerr-Newman describe el espacio-tiempo de un hoyo negro masivo, rotante y cargado eléctricamente. Con mucho trabajo

se ha logrado demostrar rigurosamente que, en la teoría de la relatividad general, no puede existir un espacio-tiempo más general que posea un horizonte de eventos. Es decir, el hoyo negro es un objeto relativamente simple ya que está enteramente determinado por sólo tres parámetros: masa, carga y momento angular; en eso recuerda bastante a una partícula elemental que también está descrita por un número reducido de parámetros físicos.

A diferencia del hoyo negro de Schwarzschild, tanto el de Reissner-Nordstrom como el de Kerr y el de Kerr-Newman poseen *dos* horizontes de eventos, uno dentro del otro. Lo peculiar de estos espacio-tiempos es su topología, ya que se pueden interpretar como varios universos conectados entre sí por medio de horizontes de eventos que se repiten en cada universo. Incluso cabe la posibilidad de que un navegante espacial pueda penetrar un hoyo negro cruzando primero su horizonte externo, luego el interno, y, a continuación, recorrer una trayectoria inversa para salir del hoyo negro. Para un observador externo, emergería de un "hoyo blanco": un cuerpo al que nada puede entrar y del que todo es expelido. ¿Adónde saldrá el navegante?: quizás a una región lejana de este universo, o quizás a un universo paralelo.

Hoyos de gusano

Los llamados "hoyos de gusano" son otros miembros del zoológico de curiosidades geométricas del espacio-tiempo. Son semejantes a los hoyos negros en poseer también un horizonte y desde fuera se ven como ellos. Sin embargo, su interior es muy distinto: dentro del horizonte se encuentra un túnel en el espacio-tiempo que permite comunicar con otro universo, el cual se puede identificar, según el gusto, con un universo paralelo o con alguna otra región del nuestro propio. En este segundo caso, un hoyo de gusano sería un medio muy conveniente de comunicación entre regiones

muy alejadas del Universo, pues serviría de atajo en el espacio-tiempo. Para todo fin práctico, sería un viaje realizado a una velocidad arbitrariamente grande; pero, como ya vimos, un desplazamiento más rápido que la luz es equivalente a una inversión entre pasado y futuro. Podría suceder, por lo tanto, que una nave espacial penetrara un hoyo de gusano para salir en una región lejana del Universo y después, regresando por el mismo camino, llegara a la Tierra antes de haber salido. El hoyo de gusano funcionaría exactamente como una máquina del tiempo.

Por el momento, tales posibilidades pertenecen al reino de la ficción científica. A diferencia de los hoyos negros, cuyo origen es comprensible a partir de la evolución de las estrellas, los hoyos de gusano no pueden formarse en algún momento, sino que deben ser objetos eternos. Si acaso, se puede argüir que se originaron en épocas muy remotas del Universo, en la llamada era de Planck (que mencionaremos en el capítulo IX), cuando el espacio y el tiempo estaban regidos por las fluctuaciones cuánticas; estos túneles serían los remanentes de aquellas fluctuaciones primordiales. Todo esto, por supuesto, es simple elucubración basada en propiedades matemáticas de los espacios riemannianos y no necesariamente tienen conexión con el mundo material.

Todo lo anterior suena a ciencia ficción. Si lo mencionamos es sólo con la intención de mostrar la enorme variedad y riqueza matemática del espacio-tiempo riemanniano. Que describa algo real es otro asunto. Por ahora, lo tomaremos como una indicación de que el mundo de las ideas matemáticas puede ser más vasto en ciertas direcciones que el mundo de los objetos sensibles.

El Universo

Cuando Isaac Newton descubrió que la gravitación es un fenómeno universal y que todos los cuerpos se atraen entre

sí, se enfrentó con un problema muy serio: ¿cómo es posible que las estrellas todas no acaben amontonadas en un punto debido a sus mutuas atracciones? La única explicación que se le ocurrió fue que el Universo es infinito, de tal modo que no existe ningún centro hacia donde la materia pueda colapsarse. En un universo infinito y perfectamente homogéneo, la atracción de la materia de un lado siempre se compensa por la atracción del lado opuesto.

Por supuesto, un universo infinito no está exento de problemas conceptuales. Después de Newton, siguieron dos siglos de discusiones metafísicas hasta que, en 1916, Albert Einstein propuso una solución novedosa basada en su teoría general de la relatividad. Con el fin de resolver la vieja disputa sobre si el Universo es finito o infinito, concibió un universo limitado en extensión pero sin fronteras, en el que el espacio cósmico de tres dimensiones se curva para cerrarse sobre sí mismo. Algo semejante a la superficie bidimensional de la Tierra. Una nave espacial que se mueva siempre en la misma dirección en el universo de Einstein regresaría, eventualmente, a su punto de partida, tal como un Magallanes cósmico.

Cuando Einstein publicó su modelo cosmológico, todavía no se había descubierto la expansión cósmica, por lo que el universo que imaginó originalmente era estático e inmutable. Pero persistía el problema del colapso de toda la materia debido a la gravedad; para resolverlo, Einstein tuvo la ocurrencia de incluir un término adicional en sus fórmulas, la llamada "constante cosmológica", que corresponde físicamente a una repulsión cósmica cuyo efecto es impedir el colapso del universo. Pero tal solución nunca dejó satisfecho al mismo Einstein, pues implicaba añadir a su teoría un elemento adicional prácticamente sacado de la manga.

El universo finito y cerrado de Einstein poseía una cierta densidad de masa. Al año siguiente de que publicara su trabajo, el astrónomo holandés Willem de Sitter descubrió que las ecuaciones de la teoría de la relatividad también admi-

ten, como posible solución, un universo infinito y desprovisto de materia, en expansión debido justamente a la repulsión cósmica. En tal universo, dos partículas se separarían continuamente, aumentando la distancia entre ellas en forma exponencial, es decir, duplicándola cada determinado tiempo.

El descubrimiento teórico de De Sitter fue toda una sorpresa en su momento, pues implicaba que, de acuerdo con la teoría de la relatividad, un cuerpo material puede moverse aun en el espacio totalmente vacío. Esto, a su vez, refutaba el "principio de Mach", según el cual la masa inercial de un cuerpo estaría determinada por la atracción gravitacional de todas las masas existentes en el Universo. Einstein mismo había utilizado ese principio para sentar las bases conceptuales de su teoría, pero el modelo cosmológico de De Sitter, consecuencia de esa misma teoría, era un ejemplo de que se podía prescindir perfectamente de tal principio, ya que cabía la posibilidad de que, en un universo sin estrellas, las partículas pudieran moverse sólo por las propiedades dinámicas del espacio, sin la influencia de la materia.

La expansión del espacio, como en el modelo sencillo de De Sitter, es algo perfectamente real y comprobable. Debido al llamado efecto Doppler, la luz de una galaxia que se aleja nos llega con menos energía (más roja) que la emitida. De hecho, a principios de los años veinte, era evidente que la relatividad general, incluso sin necesidad de recurrir a la "constante cosmológica", implicaba una expansión cósmica.

Einstein llamó a la constante cosmológica "el error más grande de mi vida", y De Sitter escribió que "arruinaba la simetría y elegancia de su teoría, uno de cuyos principales méritos consiste en explicar tanto sin introducir nuevas hipótesis o constantes empíricas". Pero el Universo no tiene por qué ser tan simple como uno quisiera, como veremos en el capítulo X.

En 1922, el físico ruso Alexander Friedmann publicó un trabajo en el que mostraba que, de acuerdo con la relativi-

dad general, el Universo se tiene que expandir, ya sea indefinidamente o hasta cierto punto a partir del cual empezaría a contraerse. Friedmann encontró que las ecuaciones fundamentales de la teoría de Einstein permiten varias posibilidades, mucho más interesantes que el universo estático, con o sin la polémica constante cosmológica. Por ejemplo, el Universo podría ser curvo o plano, y de extensión infinita; todo depende de la densidad de materia. Si ésta fuese menor que cierto valor crítico, el espacio real sería, a gran escala, como el de Bolyai y Lobachevski, no como el de Euclides. En cambio, si esa densidad de materia excediese cierto valor crítico, el Universo sería cerrado y finito; en ese caso, la expansión se detendría en algún momento debido a la atracción gravitacional de su propia materia, para iniciar una contracción.

En resumen, el Universo podría ser infinito y en expansión, en cuyo caso sería análogo a una superficie infinita de hule que se estira homogéneamente en todas las direcciones. O podría ser finito y cerrado sobre sí mismo, como lo concibió originalmente Einstein, y sería como la superficie de un globo que se está inflando. Todo depende de la cantidad de materia.

En un principio, el trabajo de Friedmann no fue tomado en serio por la comunidad científica, incluyendo al mismo Einstein. Pero una década después de su publicación, Edwin Hubble logró medir por primera vez la distancia a las galaxias y descubrió que todas ellas presentan una velocidad de recesión; así comprobó que el Universo efectivamente se expande. (Para entonces, Friedmann había fallecido en Rusia, víctima de una epidemia de tifoidea.)

La teoría de la relatividad general nos ofrece una amplia gama de universos teóricamente posibles; pero, para saber en qué clase de universo vivimos realmente, no queda más remedio que recurrir a las observaciones astronómicas. Las evidencias astronómicas más recientes coinciden muy bien con las predicciones teóricas e indican que el Universo tuvo un principio hace unos 14 mil millones de años. Asimismo,

esas mismas evidencias son consistentes con un universo perfectamente plano. La idea original de Einstein de un universo cerrado no se sostiene, a pesar de la forma ingeniosa como resuelve el dilema de la finitud sin límites. Estamos otra vez en un universo plano, aparentemente infinito, con la única diferencia de que ahora sabemos que se expande. Volveremos al tema en el capítulo X.

[40] Estrictamente hablando, un punto sobre la superficie terrestre se mueve casi en línea recta y con velocidad uniforme. El efecto de la rotación de la Tierra sobre su eje y su movimiento circular son prácticamente imperceptibles.

[41] Si un vehículo se mueve con velocidad v_1 en una dirección y otro vehículo se mueve en la misma dirección con velocidad v_2, la velocidad del primero con respecto al segundo, según la teoría de la relatividad, es:

$$\frac{v_1 - v_2}{1 - \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

[42] El tiempo del viajero se contrae, con respecto al tiempo del observador fijo, por un factor $\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}$, donde ves la velocidad del viajero.

[43] Véase, por ejemplo, S. Hacyan, *Relatividad especial para estudiantes de física*, UNAM-FCE (Ediciones Científicas Universitarias), México, 1996.

[44] Por ejemplo, el radio de un hoyo negro de 10 veces la masa del Sol sería de unos 30 kilómetros. La fórmula exacta para el radio de Schwarzschild es $\frac{GM}{2c^2}$, donde G es la constante gravitacional de Newton, M la masa del objeto y c la velocidad de la luz.

[45] Véase S. Hacyan, *Los hoyos negros y la curvatura del espacio-tiempo*, 3ª ed., FCE-SEP-Conacyt (La Ciencia para Todos, núm. 50), México, 2003.

VII. El cuanto

> Lo que observamos no es la naturaleza misma, sino la naturaleza expuesta a nuestros métodos de cuestionamiento.
>
> Werner Heisenberg

La teoría electromagnética de Maxwell fue un puente entre la física clásica y la moderna, ya que sirvió de preludio a las dos grandes teorías que transformaron por completo nuestra visión del mundo: la relatividad y la mecánica cuántica. La primera, que mencionamos en el capítulo anterior, fue obra principalmente de Einstein; la segunda fue desarrollada inicialmente por Max Planck, el mismo Einstein y Niels Bohr, a quienes siguieron muchos otros notables fundadores de esta nueva física.

El electrón, partícula constituyente del átomo, fue descubierto en 1897 por J. J. Thomson, y la estructura del átomo fue elucidada por Ernest Rutherford en 1911. Muy pronto, estos descubrimientos pusieron de manifiesto que la física de Newton, si bien describe perfectamente el mundo macroscópico, no se aplica a los fenómenos físicos que ocurren en el mundo de los átomos. Para describir esa realidad, hubo necesidad de crear una nueva teoría, la mecánica cuántica, drásticamente distinta de la newtoniana en cuanto a sus principios básicos.

Esta nueva teoría no sólo modificó los conceptos de espacio y tiempo, sino que llegó a replantear el problema filosófico de la existencia de una realidad objetiva. En la interpretación de Bohr y Heisenberg, que veremos a continuación, el observador no puede abstraerse de lo que observa, ya que el mundo microscópico que estudia es producto, en parte, de lo que él mismo contribuye a poner con sus aparatos de observación.

Cuantización

El nacimiento de la mecánica cuántica se puede situar en el año 1900, cuando Max Planck, después de muchos intentos, encontró finalmente la fórmula matemática que describe la radiación emitida por un *cuerpo* negro (esencialmente, un horno cerrado cuyas paredes están en equilibrio térmico con la radiación que emiten y absorben). Cuando un cuerpo se calienta, sus moléculas vibran con diversas frecuencias y emiten luz. Un problema básico de la física del siglo XIX consistía en determinar la forma de esa radiación en función de la temperatura del cuerpo. En su trabajo original, Planck tuvo la idea de postular lo que, en su momento, parecía sólo un truco matemático: que la energía de vibración de las moléculas no puede tomar valores continuos, sino que debe ser un múltiplo entero de cierta energía fundamental. La relación entre esa energía fundamental E y la frecuencia de vibración ν está dada por la fórmula

$$E = h\nu,$$

donde h es la llamada constante de Planck. La energía de vibración de una molécula, postuló Planck, está *cuantizada*, como si existiera en unidades de energía que se pueden contar de uno en uno: E, $2E$, $3E$, $4E$, etcétera.

La constante de Planck resultó ser, junto con la velocidad de la luz, una de las constantes fundamentales de la naturaleza. Para Planck, empero, su descubrimiento sólo era un truco matemático. Fue Einstein quien, en un célebre artículo publicado en 1905, mostró el verdadero sentido físico de lo que había descubierto su colega: la luz se compone de partículas que son paquetes de energía, y la energía de cada paquete está dada por la fórmula de Planck, donde ν corresponde a la frecuencia de la luz. En realidad, es la energía de la luz la que está cuantizada. Algunos años después, la partícula de luz fue bautizada con el nombre de *fotón*: se trata de una partícula de energía pura, sin masa.

El siguiente paso importante fue el descubrimiento por Rutherford y sus colaboradores de que el átomo se compone de un núcleo atómico de carga positiva rodeado de electro-

nes, partículas con carga negativa. Niels Bohr propuso en 1913 un modelo teórico del átomo que rompía con todos los elementos de la mecánica clásica. Siguiendo con las ideas de Planck y Einstein, mostró que la luz emitida por el átomo de hidrógeno se puede explicar suponiendo que los electrones sólo pueden tener energías bien definidas. En el modelo de Bohr, los electrones giran alrededor del núcleo atómico, como los planetas giran alrededor del Sol, pero con una diferencia fundamental: los electrones sólo pueden estar en órbitas bien definidas. En el átomo de hidrógeno, el más simple de los átomos, sólo son permitidas aquellas órbitas con una energía

$$E = \frac{-E_0}{n^2},$$

donde E_0 es la energía de la órbita básica, y n es un número entero que va desde 1 hasta infinito; es decir, la energía de un electrón es negativa y de magnitud $E_0, \frac{E_0}{4}, \frac{E_0}{9}, \frac{E_0}{16}$, etc. El salto de un electrón de una órbita a otra produce la emisión o absorción de un fotón con una energía definida por la fórmula de Planck (figura VII.1) y correspondiente al cambio de energía del electrón.

Complementariedad

La vieja controversia sobre la naturaleza de la luz —¿onda o partícula?— parecía definitivamente resuelta en el siglo XIX gracias al éxito de la teoría de Maxwell: quedaba demostrado que la luz es una onda electromagnética. Pero he aquí que, a principios del siglo XX aparecían nuevos fenómenos físicos indicando claramente que la luz también se comporta como partícula. Esta aparente paradoja no habría de encontrar solución en el marco de una descripción clásica de la realidad, sino que sentaría las bases para una nueva

teoría en la que la dualidad entre onda y partícula sería un principio fundamental, en lugar de un problema a resolver.

La coexistencia de dos propiedades contradictorias en un mismo ser es un concepto bastante conocido en muchas doctrinas filosóficas, pero adquiere una característica especial en la mecánica cuántica. Una partícula del mundo atómico, como un fotón o un electrón, se comporta a veces como onda y a veces como partícula. Así como la luz, que se creía era una onda, exhibe propiedades de partícula en ciertas circunstancias, una partícula como el electrón puede comportarse como onda. Éste es el principio de dualidad onda-partícula, que fue propuesto por primera vez en forma explícita por Louis de Broglie en 1924.

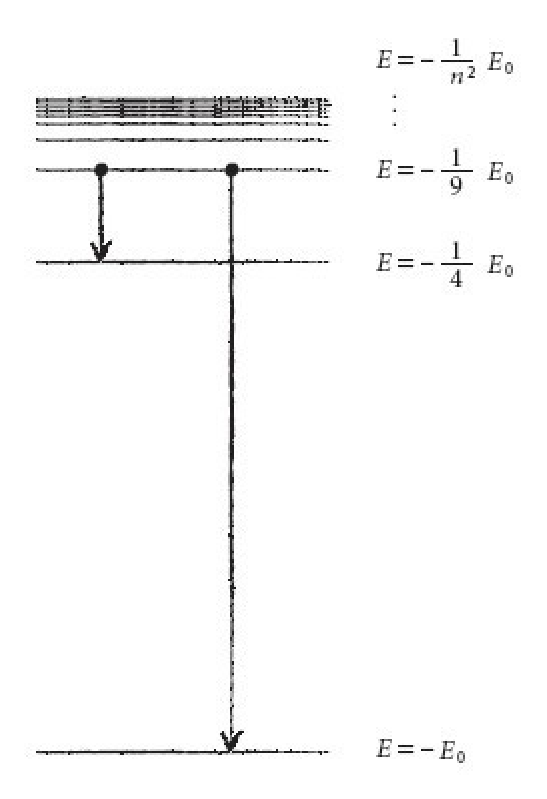


Figura VII.1

Una onda es un objeto extendido que puede cubrir una región relativamente grande del espacio y pasar simultánea-

mente por varios lugares; una partícula, en cambio, es un objeto compacto, localizado y que sólo puede estar en un sitio a la vez. Las ondas tienen la importante propiedad de interferir unas con otras cuando se superponen, es decir se *suman y restan.* Cuando dos ondas luminosas llegan a una pantalla desde fuentes distintas, producen lo que se llama un *patrón de interferencia,* que es una sucesión alternada de franjas brillantes y oscuras:[46] donde coinciden una cresta con otra o un valle con otro, éstos se suman, pero donde coinciden una cresta y un valle, los dos se *cancelan* mutuamente (figura VII.2). Este comportamiento es por completo distinto del de las partículas: éstas sólo pueden *sumarse* y amontonarse unas sobre otras sin presentar ninguna interferencia (figura VII.3).

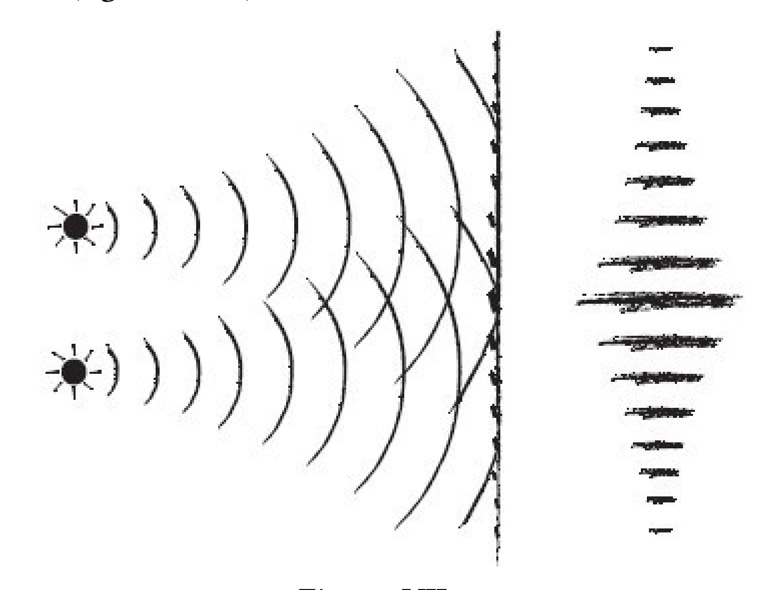


Figura VII.2

¿Cómo se manifiesta la naturaleza dual de los electrones? Si son ondas, entonces un haz de electrones que pase por dos agujeros de una pared debería dividirse en dos ondas, las cuales formarían un patrón de interferencia al llegar sobre una pantalla (figura VII.4). Y, en efecto, así sucede, como lo muestran numerosos experimentos que ya son clásicos. Hasta aquí parecería que no hay ningún problema concep-

tual, ¿pero qué sucede si algún experimentador indiscreto decide observar por cuál abertura pasa cada electrón, uno por uno? Esto se puede lograr poniendo en cada orificio de la pared algún detector de electrones que haga "clic" al paso de una partícula, después de lo cual se ubica dónde llega en la pantalla. Pero si se observa por dónde pasa cada electrón... ¡desaparece el patrón de interferencia! Los electrones simplemente se amontonan enfrente de cada orificio, tal como lo harían las partículas comunes y corrientes. La situación se puede resumir de la siguiente forma: si un observador humano diseña un experimento para ver a los electrones como ondas, éstos se comportan como ondas, y si diseña un experimento para verlos como partículas, entonces se comportan como partículas. No es que los electrones adivinen las intenciones del experimentador; más bien, es el tipo de experimento el que determina cómo se van a manifestar. Este experimento contiene el misterio fundamental de la mecánica cuántica, como bien lo señaló Richard Feynman (recomendamos al lector interesado la discusión original de Feynman).[47]

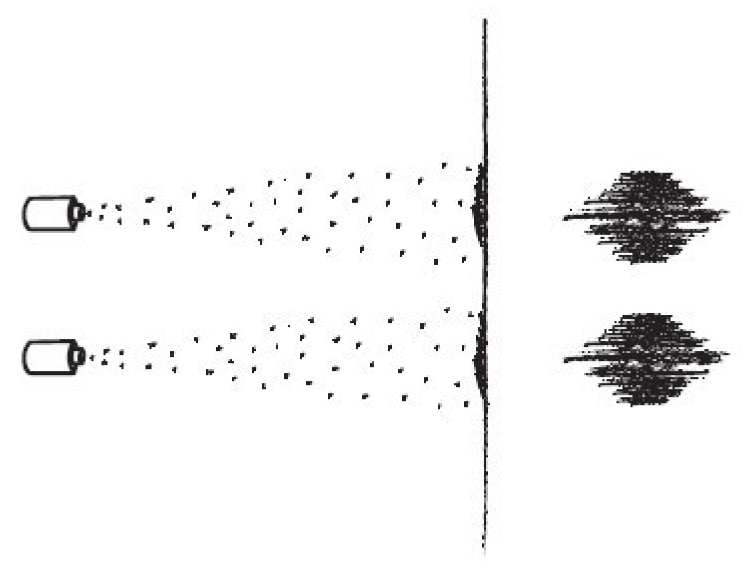


Figura VII.3

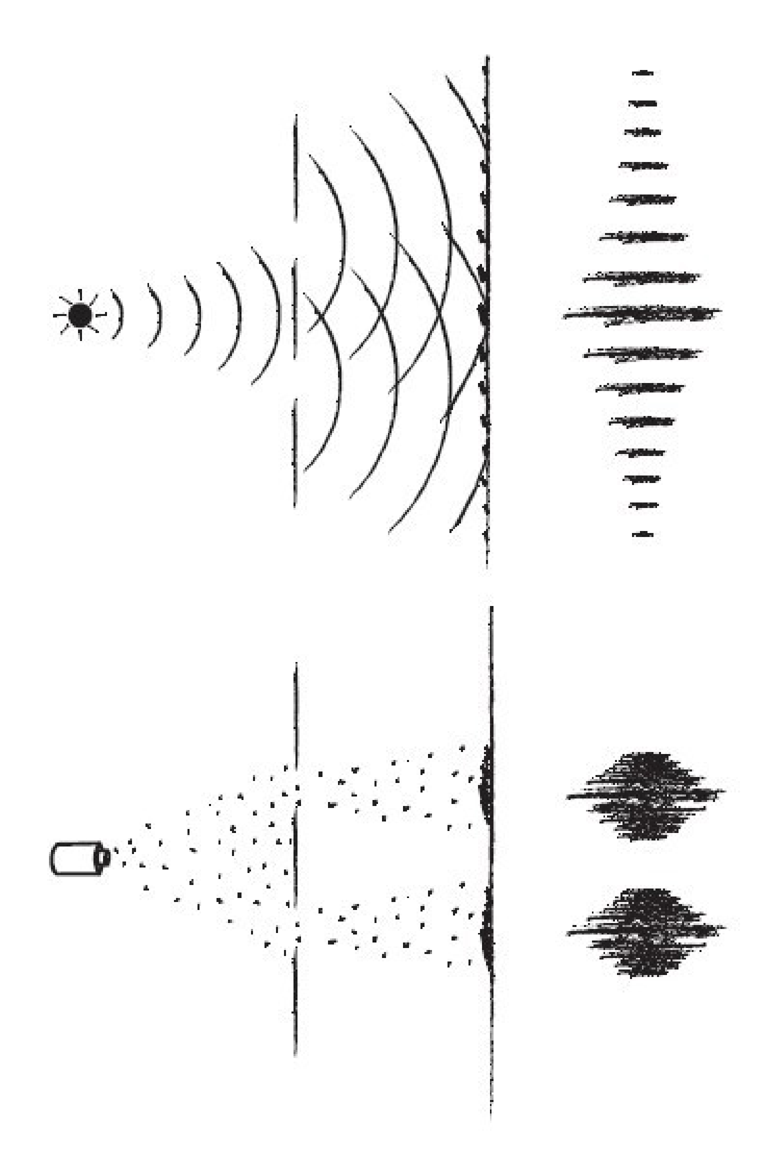


Figura VII.4

Niels Bohr reconoció la necesidad de recurrir a una descripción dual de la naturaleza, para lo cual propuso el principio de *complementariedad*: dos descripciones distintas y hasta contradictorias entre sí se complementan para aprehender la realidad. Pero el punto esencial en el que insistió Bohr es que el acto de observar la realidad influye en

cuál de esos aspectos se manifestará, de modo tal que, al captar uno de los aspectos, debemos renunciar al otro. Si vemos al electrón como onda, excluimos toda posibilidad de percibirlo como partícula, y viceversa.

La complementariedad también se manifiesta en otro aspecto: la descripción en términos espaciales y dinámicos. En principio, en la mecánica clásica, se puede especificar simultáneamente la posición de una partícula y su impulso (masa multiplicada por velocidad). Pero posición e impulso en la mecánica cuántica son descripciones complementarias. De acuerdo con el famoso *principio de incertidumbre* de Werner Heisenberg, determinar la posición de una partícula influye sobre su impulso y viceversa. En el mundo cuántico, si decidimos medir con gran precisión la posición en el espacio de un electrón, tendremos necesariamente que alterar su impulso y esto será a costa de perder la precisión con la que podemos determinar sus propiedades dinámicas; del mismo modo, un experimento diseñado para determinar con gran precisión el impulso de un electrón afectará su posición y no permitirá saber con exactitud dónde se encuentra.

¿Tienen, entonces, la posición y el impulso existencias objetivas, independientes de un observador? Tal parece que, como observadores, tenemos la posibilidad de influir sobre la realidad objetiva. Esta aparente paradoja es fundamental en mecánica cuántica y volveremos a ella más adelante.

La mecánica matricial

Las bases físicas y conceptuales de la mecánica estaban bastante bien establecidas en los años veinte, pero faltaba un aparato matemático que permitiera resolver problemas específicos en forma sistemática. El primer paso en esa dirección se debe a Werner Heisenberg, quien formuló en 1925 lo que ahora se conoce como mecánica matricial en un artículo bastante oscuro, pero cuyas concepciones, vistas a

la distancia de los años, resultaron ser perfectamente correctas y coherentes. La idea básica consistía en utilizar objetos matemáticos más generales que los simples números para describir la naturaleza.

Todos sabemos que 2 por 3 es lo mismo que 3 por 2, y que, en general, "el orden de los factores no altera el producto". Esta regla parece muy natural, pero, siendo el mundo de las matemáticas tan vasto y complejo, ¿por qué habría de limitar sus leyes a conceptos basados en lo que conocemos de los números comunes? Ésta es la pregunta que empezaron a plantearse algunos matemáticos en el siglo XIX.

Uno de los grandes inventos matemáticos es el álgebra, que utiliza símbolos en lugar de números específicos. En lugar de hablar de productos como 2 por 3, 2 por 4, y así *ad infinitum*, los matemáticos árabes se dieron cuenta de que era más simple escribir "*a* por *b*", donde *a* y *b* representan cualquier número. De esta forma, la regla sobre el orden de los factores se enuncia simplemente: "*a* por *b* es igual a *b* por *a*".

El siguiente paso importante consistió en reconocer que los símbolos pueden significar muchas cosas, y no necesariamente números como se enseña en los cursos elementales de álgebra. ¿Por qué no habrían de existir, en el mundo de las matemáticas, "objetos" semejantes a los números, pero con otras reglas de multiplicación? Por ejemplo, "objetos" matemáticos que no tuvieran que satisfacer la regla de que "el orden de los factores no altera el producto". Un ejemplo son las llamadas *matrices*, que son conjuntos de números "normales" con sus propias reglas de "multiplicación". Fue en el siglo XIX cuando los matemáticos empezaron a explorar nuevas álgebras, con operaciones más generales que las sumas y multiplicaciones de los números comunes.

Las nuevas álgebras no se quedaron restringidas por mucho tiempo al mundo de las matemáticas, sino que encontraron una correspondencia en el mundo material gracias a la mecánica cuántica de Heisenberg. En su artículo de 1925,

mostró que los conceptos básicos que corresponden a cantidades tan comunes como la posición, la velocidad o la energía, transpuestas al mundo cuántico, no se pueden describir con números sin caer en contradicciones, pero sí con objetos matemáticos más generales. Los números comunes sólo aparecen como consecuencia de las mediciones, pero no tiene sentido decir, por ejemplo, que la velocidad de un electrón es de tantos metros por segundo si no se ha medido todavía.

Heisenberg utilizó matrices en lugar de números, creando así lo que él llamó mecánica matricial. Más tarde, John von Neumann generalizó el concepto a objetos más generales, que los matemáticos llaman *operadores* en un espacio abstracto concebido por Hilbert: son símbolos adecuados para representar conceptos físicos como la posición o la velocidad de las partículas del mundo atómico. Para estos objetos matemáticos, la famosa regla de la multiplicación no se aplica: no es lo mismo medir la velocidad y luego la posición de un electrón, que al revés. El resultado de las mediciones sí depende del orden de los factores. Más aún, al tener la libertad de escoger ese orden, nosotros, como sujetos, influimos en lo que observamos. Por ello, en la física cuántica, no es posible separar al sujeto de sus mediciones.

La función de onda

Al año siguiente de que Heisenberg presentara su mecánica matricial, Erwin Schrödinger encontró un formalismo teórico más práctico que publicó en un notable artículo donde aparece por primera vez la famosa ecuación que lleva su nombre. Schrödinger demostró que los problemas que surgen en la mecánica cuántica se pueden resolver formalmente calculando lo que los matemáticos llaman los “valores propios” de una cierta función compleja, *la función de onda* Ψ .

A distancia, es posible reconstruir cuál debió ser el razonamiento de Schrödinger para llegar a su formulación matemática. Por esa época había aparecido ya el modelo del átomo de Bohr que mencionamos más arriba, basado en la hipótesis fundamental de que las energías de los átomos sólo tienen ciertos valores determinados por números enteros. En cambio, en la mecánica clásica, las propiedades físicas de los objetos suelen estar descritas por números reales, es decir, todo un continuo de números tanto positivos como negativos. Seguramente Schrödinger se preguntó: ¿en qué condiciones físicas especiales aparecen números enteros? Quizás recordó entonces que la vibración de una cuerda exhibe justamente esta propiedad. Como todo músico sabe desde la época de Pitágoras, una cuerda, sujeta en sus extremos, vibra con una frecuencia fundamental (su nota musical), así como con frecuencias que son múltiplos *enteros* de esa fundamental. El movimiento de una cuerda vibrante, y en general cualquier movimiento ondulatorio, se puede describir matemáticamente con lo que se llama, en términos técnicos, una ecuación de onda. En un golpe de inspiración, Schrödinger encontró la ecuación fundamental que describe todos los procesos atómicos; justamente una ecuación de onda, cuya forma precisa depende de la clase de interacción atómica que uno proponga (por ejemplo, una atracción eléctrica entre el núcleo atómico y sus electrones circundantes).

El artículo de Schrödinger de 1926 es uno de los más importantes de la ciencia del siglo XX. Establece los fundamentos de la física cuántica y también los de la química moderna, ya que permite explicar por primera vez la configuración electrónica de los átomos y la forma en la que éstos se pueden combinar entre sí para formar moléculas. Desde su descubrimiento, la ecuación de Schrödinger sigue siendo la base de la mayoría de los trabajos de física cuántica. Funciona estupendamente, pues permite calcular y predecir efectos del mundo atómico con una enorme precisión, aun-

que su derivación parece deberse a un acto de intuición y sigue siendo tan oscura como la presentó su autor originalmente.

Schrödinger pensaba en un principio que su ecuación describía las "vibraciones" de algún medio, por lo que las partículas atómicas no eran realmente entes indivisibles, sino semejantes a las ondas en un fluido. De hecho, pensaba que una partícula atómica, como el electrón, era literalmente una onda, por lo que había que regresar al concepto de la materia como un continuo, en contra de la hipótesis de los átomos. Sin embargo, Max Born propuso una interpretación alterna que, hasta ahora, es la más aceptada y que Niels Bohr adoptó de inmediato. En la interpretación de Born, la función de onda (o más precisamente su módulo al cuadrado) representa la probabilidad de encontrar una partícula con ciertas propiedades. Se trataría, así, de "ondas de probabilidad". Por ejemplo, la función de onda de un electrón, expresada en términos de coordenadas espaciales, describe la probabilidad de encontrar a la partícula en cada punto del espacio alrededor del núcleo central. Al mismo Schrödinger nunca le agradó esta interpretación, pero es la que ha subsistido hasta la fecha.

De todos modos, la interpretación probabilística de Born no estaba exenta de dificultades conceptuales, como él mismo estaba consciente, pues escribió: "A pesar de que los movimientos de las partículas no están determinados más que por probabilidades, estas mismas probabilidades evolucionan de acuerdo con leyes causales." Para aclarar este problema y muchos otros relacionados surgió lo que se llegó a conocer como la *interpretación de Copenhague* de la mecánica cuántica, en honor a la ciudad de residencia de Niels Bohr, su principal proponente.

En cuanto al formalismo de Heisenberg, que a primera vista parece tan distinto del de Schrödinger, quedó establecido muy pronto que, desde un punto de vista puramente formal, los dos son perfectamente equivalentes. Es posible,

por medio de transformaciones matemáticas, pasar de una descripción en términos de matrices a una en términos de funciones de onda. Es sólo cuestión de conveniencia cuál utilizar para cada problema particular.

Copenhague

Para 1930 el formalismo matemático de la mecánica cuántica había sido plenamente establecido, pero las interpretaciones filosóficas seguían siendo objeto de acalorados debates. Poco a poco se fue imponiendo la llamada interpretación de Copenhague, a pesar de la resistencia de físicos tan prestigiados como Einstein, Planck y Schrödinger.[48]

Según esta interpretación, la función de onda describe todos los estados de un objeto atómico (un átomo, un electrón, etc.) porque éste se encuentra efectivamente en todos esos posibles estados simultáneamente mientras no se observe; el acto de observarlo lo obliga a pasar a uno de esos estados y manifestarse en él; la función de onda proporciona la probabilidad de que se encuentre en un cierto estado. Esta interpretación pone especial énfasis en la inseparabilidad del sujeto y del objeto, de tal modo que el concepto de realidad objetiva pierde su sentido obvio: en efecto, ¿qué es la realidad antes de hacer una observación? Es el acto de observar el que asigna realidad a las cosas, como insistió Bohr a lo largo de su vida, en sus escritos filosóficos.[49]

En la mecánica clásica, si se conocen la posición y la velocidad iniciales de una partícula, o en general las condiciones iniciales de cualquier sistema físico, entonces las ecuaciones de movimiento permiten calcular, al menos en principio, la posición, la velocidad o cualquier otra condición del sistema en un momento posterior. En este sentido, la mecánica clásica es una teoría *causal*: a cada causa corresponde un sólo efecto, y este efecto es susceptible de conocerse. Por supuesto, en la práctica, un problema puede ser

tan complicado que encontrar una solución exacta resulta imposible, pero esto no se debe a restricciones de principio de la mecánica clásica, sino a dificultades técnicas y limitaciones de nuestro conocimiento de la situación real. La física clásica es una teoría completa, aunque en la práctica debamos a menudo recurrir a una descripción en términos de probabilidades. Así, por ejemplo, calcular el resultado de un volado es tan complicado que, para fines prácticos, es más simple afirmar que la probabilidad de que una moneda caiga de un cierto lado es del 50 por ciento. Donde hay conocimiento incompleto o se requieren cálculos demasiado complejos, más vale recurrir a una descripción estadística, por muy completa que sea la teoría.

La situación es muy distinta en la mecánica cuántica, al menos en la interpretación de Bohr. Es necesario recurrir a una interpretación en términos de probabilidades porque una descripción causal no es posible por principio. El determinismo implícito en la mecánica clásica desaparece por completo en la mecánica cuántica.

Bohr insistió siempre en que, con la mecánica cuántica, debíamos renunciar a la pretensión de entender el mundo atómico con conceptos propios de nuestro mundo macroscópico. Por ejemplo, los electrones efectúan "saltos cuánticos" de una órbita a otra en forma impredecible. Si bien es común representar al átomo como un sistema solar en miniatura, la analogía se queda corta por un hecho fundamental: a diferencia de los planetas que pueden estar, en principio, a cualquier distancia del Sol, los electrones sólo pueden ocupar "órbitas" con energías cuantizadas y "saltar cuánticamente" de una órbita a otra. Se trata de un salto espontáneo durante el cual la partícula pierde toda "realidad física". Podemos calcular la probabilidad de que efectúen un salto, pero no cuándo eso ocurrirá exactamente.

La interpretación en términos de probabilidades tiene una aparente contradicción. Un conocimiento total de la función de onda permite calcular la probabilidad de que ese

estado sea el resultado de la medición efectuada; pero, por otra parte, la ecuación de Schrödinger permite calcular exactamente la función de onda para cualquier tiempo si se conoce la misma en algún momento inicial: por lo tanto, la mecánica cuántica debería ser una teoría perfectamente determinista. Cabe entonces cuestionar la interpretación de esta teoría en términos de probabilidades, ya que se recurre a la probabilidad cuando un conocimiento completo y causal de la realidad no es posible.

La solución al problema anterior la ofreció Heisenberg, con base en el principio de incertidumbre que lleva su nombre. La indeterminación del estado de un sistema físico tiene su origen en el acto de observarlo, porque hay un límite inherente a la certidumbre con la que se pueden medir sus propiedades. Mientras no se interfiera con un sistema físico por medio de la observación, su función de onda contiene todas las posibilidades en "potencia": ¡en el sentido utilizado por Aristóteles!, señaló Heisenberg. Cuando un observador obtiene un resultado, se produce una "reducción" del conjunto de posibilidades que equivale a una transición brusca de lo posible a lo real. Por lo tanto, las probabilidades implícitas en la función de onda se anticipan a una posible medición: en ese sentido, son "probabilidades en potencia" que no afectan la precisión con la que se puede estudiar el estado de un sistema.[50]

En resumen, la mecánica cuántica es una teoría causal y completa, y las incertidumbres asociadas a las probabilidades se deben sólo a la intervención de un observador. La ecuación de Schrödinger describe en forma totalmente determinista la evolución de la función de onda, como conjunto de todas las posibilidades. La observación reduce ese conjunto: se suele decir que la función de onda se "colapsa". Este colapso no es determinista y sólo se puede calcular la probabilidad de que la función de onda se colapse a tal o cual estado.

Durante mucho tiempo se trataron de evitar las aparentes paradojas con el argumento de que la mecánica cuántica es una descripción estadística que se aplica a un conjunto grande de partículas, pero no a una sola. Así, decir que un electrón tiene una probabilidad del 50% de estar en un cierto lugar sólo implicaría que, después de medir la posición de muchos electrones, se encontrarían la mitad de ellos en el lugar especificado; pero la mecánica cuántica no permitiría predecir dónde se encontraría un electrón solitario. En cambio, según la interpretación de Copenhague, sí tiene sentido describir a un único electrón: éste está en una superposición de varios estados, uno de los cuales lo sitúa aquí; al hacer una medición, aparece con una probabilidad del 50% de encontrarse allí. Las dos interpretaciones no se contradicen mientras se consideren conjuntos grandes de partículas, lo cual era todavía la situación a mediados del siglo XX. Sin embargo, en la actualidad, ya es perfectamente posible hacer experimentos con partículas aisladas y poner a prueba las predicciones de la interpretación de Copenhague (como veremos más adelante).

* * *

La interpretación de Copenhague pone especial énfasis en la inseparabilidad del sujeto y del objeto, de tal modo que el concepto ingenuo de realidad objetiva pierde su sentido obvio, pues ¿qué es la realidad antes de hacer una observación? Es notorio el hecho de que las concepciones de Niels Bohr parecen estar inspiradas por la filosofía de Kant; si bien el físico nunca mencionó al filósofo por su nombre, es muy probable que haya recibido la influencia de sus compañeros filósofos en Copenhague, como lo menciona Murdoch.[51] Por ejemplo, Bohr llega a hablar explícitamente de “formas de percepción” en el mismo sentido que les da Kant:

> … una conexión cercana existe entre el fracaso de nuestras formas de percepción, basado en la imposibilidad de una separación estricta entre fenómeno y medio de observación, y los límites generales de la capacidad humana para crear conceptos, que tienen sus raíces en nuestra diferenciación entre sujeto y objeto.[52]

Una vez más, lo anterior conduce a cuestiones filosóficas fundamentales sobre la existencia de la realidad objetiva. Por ejemplo, si medimos con absoluta precisión la velocidad de un electrón, esa partícula podría, por el principio de incertidumbre, estar en cualquier parte del Universo. ¿Tiene sentido objetivo, entonces, la posición de ese electrón en el espacio? Según la interpretación de Bohr, Heisenberg y otros fundadores de la física moderna, los objetos del mundo cuántico adquieren su realidad como consecuencia de nuestras observaciones.

Espín

Podemos ilustrar algunas de las peculiaridades de la interpretación de Copenhague con el concepto de *espín*, una propiedad fundamental de las partículas elementales descubierta el mismo año en el que apareció el artículo de Heisenberg. Aunque el espín de una partícula subatómica no forma parte de nuestra experiencia cotidiana, se puede describir con toda precisión por medio de conceptos matemáticos. Justamente los objetos matemáticos que describen apropiadamente al espín son matrices, que siguen unas reglas algebraicas distintas de los números comunes.

El espín está relacionado con el hecho de que una partícula elemental como el electrón tiene un comportamiento semejante al de un imán en un campo magnético. Como es bien sabido, un imán macroscópico, como la aguja de una brújula, colocado en una dirección arbitraria gira hasta alinearse con el campo magnético. Sin embargo, la diferencia fundamental con un electrón es que éste sólo puede tener dos orientaciones con respecto al campo magnético: en dirección paralela o antiparalela; cada una de estas dos direcciones corresponde a dos estados, uno con mayor energía

que el otro. En lugar de girar como una brújula, el electrón alineado antiparalelamente efectúa un salto cuántico a la posición de menor equilibrio en un tiempo que sólo se puede predecir en promedio.

El espín del electrón fue descubierto por Stern y Gerlach, en 1923, haciendo pasar un haz de electrones por un campo magnético distorsionado, de tal forma que actuara en forma distinta sobre los electrones dependiendo de su orientación. El resultado del experimento fue que los electrones se separaron en dos haces bien definidos, poniendo así de manifiesto las dos posibles orientaciones de sus espines. Ahora bien, uno puede preguntar en qué dirección está orientado el espín de un electrón si no se observa, incluso si ni siquiera hay un campo magnético. La respuesta es que el electrón, *antes* de ser observado, está en una superposición de dos estados de espín en una dirección que puede ser totalmente arbitraria. Es en el momento de colocarlo en un campo magnético cuando el electrón se manifiesta en uno de sus dos posibles estados.

Si se insiste en que la mecánica cuántica es una descripción estadística que sólo se aplica a un conjunto grande de partículas, habría que decir que el experimento de Stern y Gerlach determina lo que hace un conjunto grande de electrones: por ejemplo, en cierta situación experimental, el 70% se dirige hacia un lado y el 30% hacia otro. ¿Pero qué pasa cuando se trata de un único electrón? En este caso, según la interpretación de Copenhague, el electrón está en dos estados simultáneamente antes de ser observado; lo único que se puede "predecir" es que tiene 70% de probabilidad de tener su espín apuntando en cierta dirección, pero sólo la observación lo determina. Hasta entonces, el electrón se encuentra en una superposición de estados (al igual que el gato de Schrödinger que veremos a continuación).

El fotón, como el electrón, también posee un espín, el cual está relacionado con la polarización. Clásicamente, la luz es una onda que vibra en una cierta dirección; en situa-

ciones generales, es una superposición de estados con todas las posibles direcciones de polarización; al pasar por un filtro polarizador, sólo se transmite la luz polarizada en la dirección fijada por éste (figura VII.5). Si se hace pasar la luz polarizada así obtenida por un segundo filtro, la intensidad de la luz transmitida con respecto a la incidente, de acuerdo con la óptica clásica, está dada por un factor $\cos^2\theta$, donde θ es el ángulo entre el filtro y la dirección de polarización de la luz incidente.

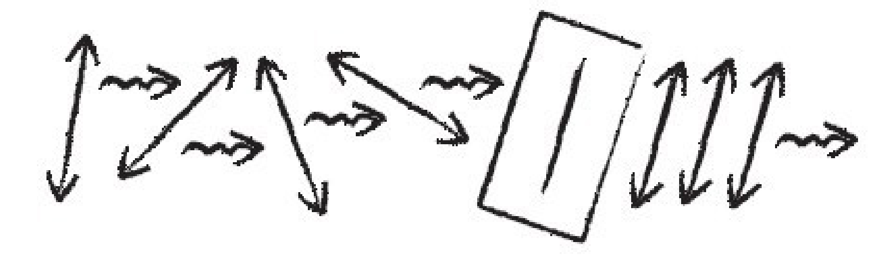


Figura VII.5

¿Cómo se interpreta cuánticamente la polarización de un fotón? Más específicamente: ¿qué le ocurre a un único fotón cuando llega a un filtro polarizador? Por supuesto, no se puede pretender que pasa una fracción $\cos^2\theta$ de él, porque el fotón es indivisible. Según la interpretación de Copenhague, el estado de un fotón polarizado es una superposición de dos estados que corresponden a dos posibles orientaciones de su espín. De hecho, se puede interpretar ese estado de polarización como una cierta superposición de dos estados de espín, antiparalelos el uno con respecto al otro. Lo anterior implica que un fotón posee dos ángulos de polarización, uno perpendicular al otro, antes de ser observado, y que después de la observación, sólo uno de esos estados se vuelve real. Si el fotón pasa por un filtro polarizador, su polarización se vuelve paralela al filtro y adquiere realidad como tal; si no pasa, su polarización se vuelve perpendicular al filtro. Es importante notar que en cualquiera de los dos casos, la realidad del fotón se determina por el ángulo del polarizador, lo cual depende de la voluntad del observador.

El sujeto que observa decide una parte de la realidad que observa, la otra parte depende del fotón porque el hecho de que pase o no es algo que no se puede determinar de acuerdo con leyes causales; cuando mucho se puede calcular su probabilidad.

El gato de Schrödinger

A Schrödinger no le gustaba la interpretación de Copenhague, por lo que elaboró una famosa paradoja para poner en evidencia las aparentes inconsistencias del principio de superposición. Supongamos el siguiente experimento mental: se encierra un gato en una caja, junto con un detector de radiación (por ejemplo, un contador Geiger), el cual puede accionar un mecanismo para destapar una botella con gas venenoso; se pone en la caja un átomo de alguna sustancia radiactiva para que, en el momento en que emita radiación, se desencadene el mecanismo que mata al gato. Ahora bien, de acuerdo con la interpretación favorita de Bohr y Heisenberg, mientras nadie observa lo que sucede dentro de la caja, el átomo está simultáneamente en dos estados —emitió radiación y no la emitió— y, por lo tanto, el gato está vivo y muerto a la vez. Sólo cuando se observa lo que sucedió en la caja se define el destino del felino.

¿Por qué no se manifiesta un gato de Schrödinger en nuestro mundo macroscópico? En la actualidad está claro que la respuesta debe buscarse en un proceso conocido como “decoherencia cuántica”. Cuando un sistema está en interacción con un aparato macroscópico de medición o, en general, con su entorno —o simplemente el resto del mundo — la función de onda pierde la coherencia entre sus diversas partes y se transforma rápidamente en una suma estadística; por ejemplo: tal probabilidad de que el gato esté vivo o de que esté muerto.

Al respecto, recordemos que las ondas presentan un fenómeno de interferencia en la que tanto se suman como se restan. Algo enteramente análogo sucede con los diversos estados superpuestos que describe la función de onda: la coherencia entre todos esos estados se manifiesta con la propiedad puramente cuántica de que pueden interferir unos con otros, al igual que las ondas. Al perder la coherencia desaparecen los efectos de onda y las probabilidades de los estados simplemente se suman, tal como sucede con las partículas en el mundo macroscópico.

En el mundo de los átomos, la decoherencia es relativamente lenta en comparación con los tiempos característicos de los procesos atómicos y, en consecuencia, se puede tener superposiciones simultáneas de diversos estados. En 1996, un equipo de físicos de la Universidad de Boulder logró construir un estado equivalente al del gato de Schrödinger, pero utilizando un átomo ionizado de berilio en lugar de un felino; el mismo átomo apareció en dos posiciones simultáneamente, separadas una distancia que es mucho mayor que el tamaño de un átomo.[53] El experimento consistió en aislar ese átomo, colocarlo en una trampa electromagnética y, por medio de láseres acoplados a las frecuencias del átomo, influir sobre sus electrones para ponerlo en una superposición de dos estados distintos. El siguiente paso fue separar esos dos estados y comprobar que se ubican en dos lugares distintos. Los detalles técnicos rebasan las intenciones de este libro, pero la conclusión a la que llegaron los físicos de Boulder es que el mismo átomo en dos estados distintos se había separado una distancia hasta de 80 millonésimas de milímetro. Esta separación es demasiado pequeña en nuestra escala común para invocar el milagro de la ubicuidad, pero es considerable en el nivel atómico porque corresponde a unas mil veces el tamaño típico del átomo de berilio. Lo importante, sin embargo, es que el experimento parece confirmar una de las predicciones de la mecánica cuántica que más frontalmente choca con nuestro sentido común.

Experimentos semejantes se han repetido también para estados de fotones, siendo posible incluso rastrear la decoherencia,[54] y más recientemente con estados de corrientes en superconductores,[55] que representan estados macroscópicos con propiedades cuánticas.

Computadoras cuánticas

En la última década del siglo XX surgió la idea de construir una computadora cuántica. En el momento de escribir estas líneas, aún estamos lejos de hacer realidad este sueño, pero los avances tecnológicos más recientes nos acercan cada vez más a la meta. Por ejemplo, es un hecho que el tamaño de los circuitos electrónicos de las computadoras ha ido disminuyendo con los años y, de seguir esta tendencia,[56] es posible que en unas cuantas décadas los mismos átomos se puedan utilizar como componentes. Las nuevas computadoras se regirían entonces por las leyes de la mecánica cuántica, con la posibilidad de hacer cálculos en paralelo, en estados superpuestos. Incluso se conocen ya algunos algoritmos que permitirían efectuar operaciones que quedan fuera del alcance de las computadoras actuales.[57] Las computadoras cuánticas, si llegaran a concretarse, serían los dignos herederos del gato de Schrödinger, ya que funcionarían con base en el mismo principio. Por otra parte, se puede especular que una computadora cuántica podría reproducir más fielmente el comportamiento del cerebro.

En un ábaco, a cada número corresponde una cierta disposición de bolas móviles ensartadas en unos alambres. Del mismo modo, en una computadora común los números se pueden expresar como voltajes en un transistor. En cambio, una computadora cuántica podría utilizar, por ejemplo, la orientación de las partículas atómicas, su espín, que puede tomar dos posibles valores. En una computadora cuántica, una “hilera” de átomos o electrones, orientados cada uno de

ellos a lo largo de una de sus dos posibles direcciones, serviría para "escribir" un número.

Pero la característica fundamental del mundo cuántico, el *principio de superposición*, es el que los físicos tratan de aprovechar. Una computadora común almacena información, la cual se mide en *bits*, y la manipula para efectuar operaciones aritméticas. En cambio, una computadora cuántica trabajaría con bits cuánticos, cubits. Cada partícula atómica puede almacenar no un bit de información, sino un cubit, una superposición cuántica de 0 y 1. Además, la interferencia entre los dos estados conduce a efectos que pueden acelerar enormemente la ejecución de cálculos. Esto, a su vez, permite construir algoritmos especiales, extremadamente rápidos, que no funcionarían con una computadora común.

Sin embargo, la principal dificultad radica en el hecho de que los fenómenos cuánticos tienen una vida media extremadamente corta, cuando entran en contacto con su entorno, debido al fenómeno de decoherencia que mencionamos más arriba. Por lo tanto, una computadora cuántica debe reunir a la vez dos condiciones que parecen poco compatibles: aislarse lo más posible y, a la vez, poderse manipular desde el exterior. Se han ensayado diversas técnicas y, aunque falta mucho por lograr, los principios físicos están bien establecidos. Las ventajas serían enormes, pues la velocidad y capacidad de una computadora cuántica excederían por amplio margen a cualquier computadora clásica.

[46] Para la luz visible, el tamaño de cada franja es de sólo unas micras, por lo que el efecto no se detecta a simple vista.

[47] R. Feynman, *Lecture Notes in Physics*, vol. III, Addison Wesley, 1968. Véase también Six Easy Pieces, Addison Wesley, 1995.

[48] Es curioso que estos físicos que sentaron las bases de la mecánica cuántica, pero se empecinaron en mantener una actitud conservadora, ya eran maduros y parte del *establishment* científico en los años veinte. En cambio, el desarrollo acelerado de la mecánica cuántica por esos años se debió a jóvenes de entonces como Heisenberg, Pauli, Dirac, Landau, etc. Bohr jugó para ellos un papel de padre espiritual.

[49] N. Bohr, *Philosophical Writings*, vols. I, II, III, Ox Bow Press, 1998.

[50] W. Heisenberg, *Physics and Philosophy*, Harper, 1958.

[51] Véase D. Murdoch, *Niels Bohr's Philosophy of Physics,* Cambridge University Press, Cambridge, 1987.

[52] Citado por Murdoch, *op. cit.*

[53] C. Monroe *et al.*, "A Schrödinger Cat Superposition State of an Atom", *Science* 272: 1131, 1996.

[54] M. Brune *et al.*, "Observing the Progressive Decoherence of the Meter in a Quantum Measurement", *Physical Review Letters* 77: 4887, 1996.

[55] G. Blatter, "Schrödinger's Cat is now fat", *Nature* 406: 25, 2000.

[56] Hay que aclarar, sin embargo, que esta tendencia no puede extrapolarse ilimitadamente, ya que en algún momento aparecerán efectos de "ruido" que crearán nuevos problemas en los circuitos.

[57] D. Bouwmester, A. K. Ekert y A. Zeilinger, *The Physics of Quantum Information*, Springer, 2000.

VIII. Realidad y acción fantasmal

La verdad es que nadie entiende
la mecánica cuántica.
R. P. Feynman

La interpretación de Copenhague no fue del agrado de todos los físicos y entre sus críticos más severos destacó nada menos que Einstein. El creador de la relatividad siempre pensó que la mecánica cuántica, cuyos éxitos no cuestionaba, era una etapa previa a una teoría más profunda que habría de surgir en el futuro y daría lugar a una concepción de la realidad acorde con nuestras ideas intuitivas. "¿Acaso la Luna deja de existir cuando nadie la mira?", preguntó alguna vez, a lo cual Bohr contestó que la Luna es un objeto macroscópico al que no afecta el hecho de que se le observe; en cambio, para "ver" un átomo es necesario bombardearlo con luz, lo cual perturba forzosamente su estado.

EPR

En un famoso artículo de 1936, Einstein y dos colaboradores suyos, Boris Podolsky y Nathan Rosen (EPR),[58] se propusieron demostrar por medio de una paradoja que la mecánica cuántica no es una teoría completa, en el sentido de que existe una realidad que no puede describir por principio. EPR imaginaron un experimento en el que es posible determinar las propiedades de una partícula haciendo mediciones en otra distante. La paradoja consiste en que la observación de una partícula determina cuáles propiedades de la otra adquieren realidad física y cuáles no, sin importar en nada la separación entre ellas. La mecánica cuántica implicaría entonces la existencia de una "acción fantasmal", como declaró Einstein algunos años más tarde: algo aún más absurdo que la "acción a distancia" de Newton.

En el mencionado artículo, los tres autores proponen primero una definición de realidad: "Si, sin perturbar un siste-

ma, podemos predecir con absoluta certeza el valor de una cantidad física, entonces existe un elemento de la realidad física que corresponde a esa cantidad física." A continuación describen un experimento mental con dos partículas inicialmente en interacción y luego separadas. Muestran que es posible determinar a distancia la posición o la velocidad de una midiendo la *posición* o la velocidad de la otra, lo cual contradice el principio de incertidumbre según el cual no se puede asignar realidad física simultáneamente a ambas cantidades físicas. En particular, si se determina la posición de la partícula lejana, se le asignará realidad física a esa cantidad a costa de que pierda realidad física la *velocidad* (principio de incertidumbre). Del mismo modo, se puede escoger determinar la velocidad, en cuyo caso será esta cantidad la que adquiere realidad física en detrimento de la otra, la *posición*.

En consecuencia, las propiedades de un sistema atómico se vuelven reales dependiendo de lo que se decida medir en un lugar lejano. Si se cree en la interpretación de Copenhague, entonces hay que admitir que esa "adquisición de realidad física" es un proceso que se puede controlar a distancia, instantáneamente. Pero si una medición no puede influir en lo que sucede en un lugar lejano, hay que aceptar que existen elementos de la realidad física antes de la medición. Y si la mecánica cuántica no los puede describir, debe ser una teoría incompleta.

En resumen, una de dos: o se puede dar una transmisión de información a velocidad infinita, o las partículas atómicas deben poseer y transportar cierta información que no tiene contraparte en la mecánica cuántica. La primera opción viola flagrantemente la teoría de la relatividad, según la cual nada puede rebasar la velocidad de la luz. EPR concluyen, entonces, que la mecánica cuántica no abarca toda la realidad ya que deben existir cantidades físicas que no puede describir. Se trataría de *variables ocultas*... ¡ocultas para la mecánica cuántica! Sin negar el valor de esta teoría,

suponen que debería haber alguna más fundamental y completa que describa la realidad física independiente de todo observador. No dan ningún indicio de cómo sería, sólo declaran: "Creemos que tal teoría es posible."

Dicho de otro modo el problema esencial de la interpretación de Copenhague, como EPR mostraron claramente, es su incompatibilidad con lo que se suele llamar "realismo local", es decir, con el hecho de que en un lugar determinado no puede producir ningún efecto un acontecimiento localizado demasiado lejos. Más precisamente, sólo pueden influir sobre un suceso aquellas causas que se encuentren en su cono de luz pasado. Cualquier violación de este principio es incompatible con la teoría de la relatividad... a menos que se acepte la posibilidad de regresar en el tiempo, como vimos en el capítulo IV.

Estados enredados

Como bien lo hizo notar Schrödinger poco después de la aparición del artículo de EPR, el meollo del asunto es el hecho de que dos o más sistemas atómicos pueden encontrarse en un "estado enredado", una situación que no tiene ningún equivalente en el mundo macroscópico. La distancia espacial entre dos sistemas en estado enredado no juega ningún papel; el hecho de hacer una medición en uno de ellos colapsa la función de onda de ambos, aun si los dos se encuentran en galaxias distintas.

La situación es una consecuencia del principio de superposición, el mismo que conduce a la paradoja del gato de Schrödinger. Siguiendo con la analogía, podemos imaginar dos gatos, digamos uno en la Tierra y otro en la Luna, en una superposición de dos estados: en uno, el gato terrestre está vivo y el lunar está muerto, y en el otro la situación es al revés. Si ahora observamos el estado del gato en la Tierra

y lo encontramos vivo, colapsamos la función de onda de ambos felinos y matamos al de la Luna, y viceversa.

¿Hay algún misterio en esto? ¡Por supuesto que no! Puesto en estos términos el asunto suena extremadamente banal, pero eso se debe a que existe una correlación perfecta entre los estados de los gatos: si uno está vivo el otro está muerto con toda seguridad y viceversa. No se ve ninguna necesidad de invocar una acción fantasmal a distancia. Sin embargo, la extrañeza de la mecánica cuántica se manifiesta plenamente en situaciones en las que no existe una correlación perfecta, es decir, cuando una medición en un lugar determina el resultado de otra sólo con cierta probabilidad y no en forma absoluta. Ésta es la esencia del teorema de Bell que veremos a continuación con más detalle.

Bell

En los años cincuenta, David Bohm propuso una versión un poco más realista del experimento mental de EPR. La idea de Bohm[59] consistió en utilizar dos partículas con espín, emitidas en dos direcciones opuestas, y medir la orientación de éstas. Por ejemplo, podría tratarse de dos electrones que se encuentran con sus espines alineados en direcciones opuestas, de tal modo que el espín total del par sea cero. En ese caso, si medimos la dirección de uno de los espines, podemos deducir a distancia la orientación del otro, el cual, de ese modo, adquiere realidad física; *pero eso dependerá de cómo orientemos nuestro aparato de medición*. Se trata de la misma situación paradójica señalada por EPR: una medición en un lugar decide la realidad física en otro lejano, en contra del principio del realismo local.

Un esquema enteramente similar se puede reproducir con parejas de fotones. La mecánica cuántica predice que si son emitidos en un estado con espín total cero, los dos fotones están en un estado enredado: una superposición de un esta-

do con el primer fotón polarizado horizontalmente y el segundo verticalmente, y de otro estado con la configuración al revés. Por supuesto, la dirección de polarización no está definida antes de una observación. La paradoja surge del hecho de que si se pone un filtro polarizador al paso de uno de los fotones y éste lo pasa, entonces adquieren realidad física tanto la polarización de ese fotón como la del otro.

Todo lo anterior se habría quedado en el reino de los experimentos mentales si no fuera porque, en 1963, John Bell mostró que es posible distinguir cuantitativamente entre las predicciones de la mecánica cuántica y una teoría local como la mecánica clásica. Si dos partículas son emitidas en direcciones opuestas, se puede medir la probabilidad de que cada una tenga una cierta dirección de espín o polarización. Bell demostró que las probabilidades conjuntas para las dos partículas, tal como las predice la mecánica cuántica, no pueden reproducirse de ningún modo invocando variables ocultas; lo cual permite comprobar experimentalmente si tales variables tienen existencia.[60]

El esquema propuesto está basado en la versión de Bohm del experimento mental de EPR. Supongamos que emitimos dos fotones en direcciones opuestas, de tal modo que los dos poseen un espín total igual a cero, y dejamos que se separen una distancia arbitrariamente grande. En cada lugar medimos la polarización del fotón que allí llega poniendo un filtro en cierta dirección (figura VIII.1). Tenemos libertad de escoger el ángulo de cada uno de los filtros. Hacemos mediciones con un número muy grande de pares de fotones, y al final obtenemos un conjunto de mediciones que nos dicen cuáles pasaron el filtro en cada lugar. Luego juntamos los datos reunidos en ambos lados, los comparamos y obtenemos una correlación entre las mediciones en los dos lugares, la cual dependerá forzosamente de los ángulos a los que se encuentran los filtros.

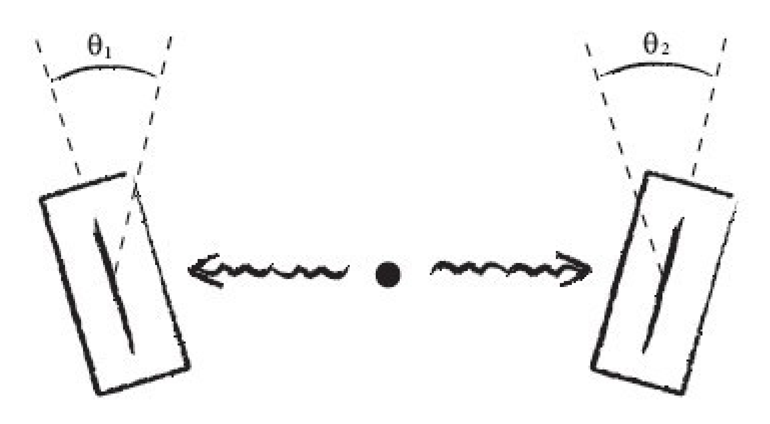


Figura VIII.1

Más específicamente, supongamos que se orientan los filtros a ángulos θ_1 y θ_2, tal como se muestra en la (figura VIII.1). Si uno de los fotones de una pareja, digamos el de la izquierda, pasa el filtro 1, entonces, según la mecánica cuántica, su polarización adquiere realidad física en la dirección θ_1. Pero entonces, ¡la polarización del fotón de la derecha también adquiere realidad física!: se vuelve perpendicular a la de su compañero; si lo hacemos incidir sobre un filtro colocado a un ángulo θ_2, entonces la probabilidad de que también lo pase es de $\text{sen}^2(\theta_1 - \theta_2)$. Remitimos al lector al Apéndice para una demostración técnica detallada.

Todo lo que hay que notar, en general, es que la probabilidad conjunta de que pasen ambos fotones sus respectivos filtros es $\frac{1}{2}\text{sen}^2(\theta_1 - \theta_2)$, y la probabilidad conjunta de que uno pase y el otro no es $\frac{1}{2}\cos^2(\theta_1 - \theta_2)$. Las cuatro posibilidades tienen probabilidades conjuntas:

$$P_{++}(\theta_1, \theta_2) = \tfrac{1}{2}\text{sen}^2(\theta_1 - \theta_2),$$
$$P_{+-}(\theta_1, \theta_2) = \tfrac{1}{2}\cos^2(\theta_1 - \theta_2),$$
$$P_{-+}(\theta_1, \theta_2) = \tfrac{1}{2}\cos^2(\theta_1 - \theta_2),$$
$$P_{--}(\theta_1, \theta_2) = \tfrac{1}{2}\text{sen}^2(\theta_1 - \theta_2),$$

donde los subíndices + y − corresponden a los casos en los que cada fotón pasa o no por el filtro que se coloca a su paso. Por supuesto, la suma de las cuatro probabilidades tie-

ne el valor de 1, que se toma por convención como una probabilidad absoluta del 100 por ciento.

Las probabilidades anteriores no parecen tener alguna propiedad misteriosa. Sin embargo, la cantidad físicamente interesante es la *correlación*, que mide, como su nombre lo indica, qué tanta correlación existe entre las mediciones en un lado y en otro. Esta correlación se define muy generalmente como:

$$C(\theta_1, \theta_2) = P_{++}(\theta_1, \theta_2) + P_{--}(\theta_1, \theta_2) - P_{+-}(\theta_1, \theta_2) - P_{-+}(\theta_1, \theta_2),$$

y en el caso de las probabilidades predichas por la mecánica cuántica, toma el valor:

$$C(\theta_1, \theta_2) = -\cos 2(\theta_1 - \theta_2)\ .$$

Esta fórmula de aspecto tan inocente encierra una profunda contradicción con cualquier interpretación realista de la física.

El teorema de Bell estipula, en forma muy general, que la correlación entre mediciones conjuntas, si están basadas en la existencia de variables ocultas, debe satisfacer cierta desigualdad matemática. La correlación dada por la fórmula anterior viola esa desigualdad. La conclusión es tan simple como profunda: la determinación experimental de las correlaciones entre partículas en estados enredados permite discriminar entre la mecánica cuántica y cualquier teoría basada en la existencia de variables ocultas (véase el Apéndice para una explicación un poco más técnica).

Por supuesto, como ya indicamos, la ausencia de variables ocultas implica que existen cantidades físicas que adquieren realidad física por medio de mediciones lejanas, es decir: no locales. ¿Permite este mecanismo transmitir información instantánea de un punto a otro del espacio? Por ejemplo, si se envían pares de fotones a dos laboratorios, uno en la Tierra y otro en Marte, ¿es posible deducir el ángulo al cual fue colocado el filtro polarizador en Marte, con sólo medir cuántos fotones pasan o no el filtro en el laboratorio terrestre? La respuesta es negativa: a pesar de que las

probabilidades conjuntas dependen de los dos ángulos de los filtros, el observador terrestre no puede conocer la estadística en Marte si no se lo comunican por algún medio tradicional; mientras no reciba esa información, sólo puede estar seguro de que su compañero marciano recibió fotones, pero no sabe cuáles pasaron o no por su filtro. Esto quiere decir que la probabilidad de que pase uno de los fotones, sin importar lo que le suceda al otro, es:

$$P_{++}(\theta_1, \theta_2) + P_{+-}(\theta_1, \theta_2) = \tfrac{1}{2}\cos^2(\theta_1 - \theta_2) + \tfrac{1}{2}\mathrm{sen}^2(\theta_1 - \theta_2) = \tfrac{1}{2};$$

lo cual simplemente implica que la mitad de las veces pasará. Lo importante es que esta probabilidad del 50 por ciento no depende del ángulo al que se colocó el otro filtro, y, por lo tanto, es imposible determinarlo con sólo mediciones locales. El mecanismo no permite establecer las condiciones lejanas, con lo cual se mantiene una "coexistencia pacífica"[61] entre la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. Sin embargo, el hecho ineludible es que las probabilidades predichas por esta última no son locales, en el sentido de que dependen de las mediciones conjuntas en lugares que pueden estar causalmente desconectados. Éste es uno de los misterios fundamentales de la mecánica cuántica.

Después del trabajo original de Bell, se encontraron otros esquemas en los cuales ni siquiera es necesario recurrir a variables continuas y desigualdades. Greenberg *et al.*[62] propusieron un experimento mental con tres partículas en el que, utilizando correlaciones perfectas, se obtienen resultados distintos según si se postula o no la existencia de variables ocultas. Asimismo, un esquema análogo, sin recurrir a desigualdades y con sólo dos partículas, ha sido descrito por Hardy.[63]

Experimentos y aplicaciones

Gracias al trabajo de Bell que permitió cuantificar las correlaciones cuánticas y poner de manifiesto, en forma clara, la diferencia con las predicciones clásicas, fue posible proponer experimentos reales y trascender por primera vez las fronteras de los experimentos mentales. El primero de esa clase de experimentos fue realizado en 1982 por Aspect y colaboradores en un laboratorio francés utilizando parejas de fotones emitidos en direcciones opuestas.[64] Al medir las correlaciones entre los ángulos de polarización de los fotones, se encontró un resultado que coincidía justamente con la predicción de la mecánica cuántica; los datos experimentales violaban las desigualdades de Bell, tal como si hubiera una acción fantasmal a distancia.

Desde entonces, se ha repetido este experimento en diversas modalidades. En una de sus últimas versiones, realizada en 1997 en Ginebra, se enviaron los pares de fotones por medio de fibras ópticas a dos regiones separadas 10 km. De esta forma no se dejaba duda de que no había ninguna influencia de una medición sobre la otra por algún mecanismo clásico: una vez más, los resultados confirmaron la predicción de la mecánica cuántica.[65]

Lo interesante de todo este asunto no es sólo la comprobación de los postulados cuánticos, sino las posibles aplicaciones tecnológicas de estos extraños efectos. En años recientes ha surgido una nueva disciplina: la información y comunicación cuánticas, con aplicaciones en criptografía,[66] transmisión segura de información,[67] "teleportación" de estados,[68] etcétera. La idea es utilizar las correlaciones cuánticas en combinación con métodos tradicionales de transmisión de información, con lo cual no se viola la localidad, pero sí se puede ahorrar canales de comunicación y, además, hacerlos más seguros.

Para que quede claro que la filosofía tiene aplicaciones tecnológicas, señalaremos que el tipo de correlación propuesto por Einstein y colaboradores puede utilizarse para transmitir parcialmente información de un lugar a otro. Es-

ta aplicación de la física cuántica ya se ha vuelto realidad. El método consiste en transportar por medios convencionales una parte de la información (por ejemplo, la mitad de los "bits" necesarios para reconstruir una imagen o un texto) y el resto por interacción cuántica.

Siguiendo con esta idea, ha surgido recientemente una ciencia de la "comunicación cuántica", con importantes aplicaciones tecnológicas. Así, desde el año 2000 empezó a utilizarse una interesante aplicación de la "acción fantasmal": la *criptografía cuántica*,[69] que utiliza las técnicas para transmitir información cuántica. En este esquema, se envían, por fibras ópticas, pares de fotones en estados enredados a dos receptores distintos; uno de ellos mide las polarizaciones de sus fotones variando el ángulo de su polarizador de acuerdo con cierta información que quiere transmitir, y envía los resultados de sus observaciones a su compañero lejano, el cual, con los otros fotones enredados, puede reconstruir el mensaje original. De esta forma, parte de la información es transmitida por medio de la acción fantasmal y otra parte por algún medio convencional que no rebasa la velocidad de la luz; no se viola la teoría de la relatividad porque sólo al juntarse las dos informaciones se puede reconstruir la original.

El método tiene la gran ventaja de ser totalmente a prueba de espías. La información enviada por los canales tradicionales es incompleta y tiene que combinarse forzosamente con los fotones enredados para reconstruir el mensaje. Si algún intruso intercepta esos fotones, colapsa su función de onda y les asigna realidad física antes de que lleguen a su destinatario legítimo, destruyendo así toda posibilidad de reconstruir la información enviada.

[58] A. Einstein, B. Podolsky y N. Rosen; “Can Quantum Mechanical Description of Reality Be Considered Complete?”, *Physical Review* 47: 777, 1935.

[59] D. Bohm, *Quantum Theory*, Prentice Hall, 1951.

[60] J. S. Bell, “On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox”, *Physics* 1: 195, 1964; véase también *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge, 1987.

[61] A. Shimony, *Internat. Philos. Quarterly* 18: 3, 1978.

[62] D. M. Greenberg, M. A. Horne, A. Shimony y A. Zeilinger, “Bell’s theorem without inequalities”, *Am. J. Phys.* 58: 1131, 1990.

[63] L. Hardy, “Quantum mechanics, local realistic theories, and Lorentz-invariant realistic theories”, *Phys. Rev.* A 68: 2981, 1992.

[64] A. Aspect *et al.*, Experimental realization of the Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A new realization of Bell´s inequalities”, *Physical Review Letters* 49: 91 1982; “Experimental test of Bell´s inequalities using time-varying analyzers”, *Physical Review Letters* 49: 1804, 1982.

[65] W. Tittel *et al.*, “Violation of Bell inequalities by photons more than 10 km apart”, *Physical Review Letters* 81: 3563, 1998.

[66] Véase, por ejemplo, T. Jennewein *et al.*, “Quantum cryptography with entangled photons”, *Phys. Rev. Lett.* 84: 4729, 2000; D. S. Naik *et al.*, “Entangled state quantum cryptography: Eavesdropping on the Ekert protocol”, *ibid.*, p. 4733; W. Tittel et al., “Quantum cryptography using entangled photons in energy-time Bell states”, *ibid.*

[67] C. H. Bennett y S. J. Wiesner, *Physical Review Letters* 69: 2881, 1992.

[68] C. H. Bennett *et al.*, *Physical Review Letters* 70: 1895, 1993; D. Boschi et al., *Physical Review Letters* 80: 1121, 1998; A. Furusawa *et al., Nature* 282: 706, 1998.

[69] T. Jennewein *et al.*, “Quantum cryptography with entangled photons”, *Physical Review Letters, 84*: 4729, 2000; D. S. Naik *et al.*, “Entangled state quantum cryptography: Eavesdropping on the Ekert protocol”, *ibid.*: 4733; W. Tittel *et al.*, “Quantum cryptography using entangled photons in energy-time Bell states”, *ibid.* : 4737.

IX. Espacio, tiempo, masa y energía

> El lenguaje ordinario es del todo inadecuado para expresar lo que la física en realidad asevera, ya que las palabras de la vida diaria no son suficientemente abstractas. Sólo las matemáticas y la lógica matemática pueden decir lo poco que el físico trata de decir.
>
> Bertrand Russell, *The Scientific Outlook*, 1931

El concepto físico de energía nació en el siglo XIX y medio siglo después fue descubierta su faceta más sorprendente e inesperada: la famosa relación entre masa y energía. Que la masa-energía total se conserva en todo proceso físico, con la posible transformación de energía en masa y viceversa, se ha vuelto una ley fundamental de la física.

Como hemos señalado anteriormente, los conceptos básicos de las teorías científicas nunca han sido bien establecidos y definidos. Más bien, con el paso del tiempo, de tanto usarlos, nos acostumbramos a verlos como naturales. Éste es el caso de la energía, que examinamos en el capítulo IV y que, en la actualidad, se tiende a considerar como un concepto más fundamental que la masa. Veamos ahora el concepto más antiguo y aparentemente más básico de masa, con la cual la energía está íntimamente relacionada en la perspectiva de la física moderna.

Masa en física clásica

Los libros de texto definen la masa de diversas maneras: por lo general se dice que es la cantidad de materia... ¡pero nunca se especifica cómo medir tal cantidad! Además, hay una confusión general entre masa y peso, ya que, para fines prácticos, la masa es enteramente equivalente al peso y así se mide: en una báscula. Sin embargo, esto sólo es correcto sobre la superficie de la Tierra; en la Luna, un cuerpo masivo pesa seis veces menos que en la Tierra, y en el espacio el peso de cualquier cuerpo es estrictamente cero. Por supuesto, esto no se sabía en la Antigüedad y se equiparaba la "cantidad de materia" con la atracción gravitatoria ejercida

sobre ella, lo cual, para fines prácticos, era más que suficiente. Incluso en épocas remotas se llegó a confundir tamaño con peso, porque los objetos grandes suelen ser más pesados que los pequeños. Arquímedes contribuyó a aclarar este punto cuando estudió la flotación de los cuerpos, pero nunca dio una definición de masa.

Pero la materia no sólo posee gravedad, sino también inercia, que es la resistencia al cambio del movimiento. El concepto de inercia, que es independiente de la gravedad, fue introducido por Kepler en su intento por encontrar la causa física del movimiento de los planetas: postuló que la materia presenta una resistencia a cambiar su estado de movimiento o reposo, por lo que un planeta permanecería inmóvil si no fuera por alguna "potencia de movimiento", proveniente del Sol, que se opone a la "impotencia" de los planetas a moverse por sí mismos. El mismo Kepler especuló que tal fuerza solar debía ser de origen magnético, pero fue Isaac Newton quien descubrió que se trata de la gravedad, una fuerza universal entre todos los cuerpos del Universo: estrellas, planetas o manzanas. También fue Newton el primero en distinguir claramente la diferencia entre la masa relacionada con la inercia y aquella relacionada con la fuerza gravitatoria, y llegó a realizar experimentos con péndulos de materiales diferentes para convencerse de que hay una equivalencia estricta entre inercia y gravedad.

Antes de Newton, Galileo había demostrado con argumentos lógicos que todos los cuerpos caen exactamente con la misma velocidad (según la leyenda, lo comprobó tirando dos piedras de pesos desiguales desde lo alto de la Torre de Pisa). Esto implica que la fuerza gravitatoria sobre un cuerpo es siempre proporcional a su inercia (la fricción del aire puede influir en la caída, como ocurre con una pluma, pero eso no tiene nada que ver con la gravedad). En lenguaje moderno, decimos que existen dos clases de masa, la inercial y la gravitatoria, y que las dos son enteramente equivalentes entre sí: éste es el Principio de Equivalencia.

Pero, ¿por qué hay esa equivalencia entre inercia y gravedad, si se trata de dos fenómenos que, a primera vista, nada tienen en común? Para comprender que no se trata de nada que debiera ser evidente, basta constatar que nada parecido sucede con las fuerzas eléctricas o magnéticas. Si un imán atrae un pedazo de hierro que tiene mucha masa inercial, le imprimirá una velocidad muy pequeña y, al revés, si se trata de un diminuto balín, será atraído con gran velocidad. La carga magnética es por completo independiente de la inercia. Asimismo, las cargas eléctricas pueden ser positivas o negativas, y cancelarse mutuamente; los cuerpos cargados se atraen o repelen según sus signos, y sus cargas nada tienen que ver con sus masas inerciales. Más aún, siempre es posible envolver una carga eléctrica en un material que la aísle de la fuerza eléctrica de otra carga. En cambio, la “carga gravitatoria” de un cuerpo es siempre igual a su masa inercial: la única manera de “descargar” la gravedad de un objeto es quitándole su masa inercial, es decir, su misma masa. El Principio de Equivalencia es uno de los grandes misterios de la física, a pesar de que se suele relegar al desván de los conceptos obvios y naturales. Hasta la fecha, el único intento de explicación se debe a Ernst Mach, quien propuso que la inercia de un cuerpo es producida por la fuerza gravitacional de toda la materia del Universo sobre él, pero esto no se ha podido confirmar. Si bien el principio de Mach le sirvió de inspiración a Einstein para elaborar su teoría relativista de la gravitación, no puede deducirse directamente de esta teoría, como lo muestra la existencia del modelo cosmológico de De Sitter que mencionamos en el capítulo anterior.

Volviendo a Newton, la definición de la masa que da en los *Principia* es en términos de “la cantidad de materia” que es “la medida de la misma, que resulta conjuntamente de la densidad y el volumen”. De donde podemos inferir que para Newton, y probablemente para sus contemporáneos, la densidad era un concepto más primario que la masa; después de

todo, es evidente que hay cuerpos más densos que otros, aunque en la actualidad tendemos a pensar más en términos de masa.

Una vez presentada la masa a los lectores, Newton pasa a definir el movimiento como "la medida conjunta de la velocidad y la cantidad de materia". Después de lo cual postuló su famosa segunda ley en su forma original: "El cambio del movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa."

La segunda ley en la forma "fuerza igual a masa por aceleración", tal como se enseña en las escuelas, no se encuentra en la obra de Newton, sino que se debe a Leonard Euler, quien desarrolló la mecánica en el siglo XVIII y le dio la forma que se utiliza actualmente. Para Euler, el concepto primario era la fuerza, ya que la masa sólo puede ser medida observando el movimiento de un cuerpo al cual se le aplica una fuerza de cierta magnitud. En consecuencia, Euler definió la masa de un cuerpo como la razón entre la fuerza aplicada y la aceleración producida. Estrictamente hablando, ésta es la definición de la masa inercial, sin ninguna referencia a la gravedad.

Sin embargo, la fuerza como un concepto primario no estuvo libre de críticas. Jammer[70] señala que, debido a la nueva actitud positivista en el siglo XIX: "Lo que alguna vez, en la física newtoniana, jugó un papel central, llegó a ser considerado una oscura noción metafísica que debía ser desterrada de la ciencia."

¿Es posible medir la masa de un cuerpo sin recurrir a una fuerza, en general, o a la gravedad, en particular? En un intento por aclarar este problema, Ernst Mach mostró que la razón de masas (inerciales) entre dos cuerpos se puede medir, al menos en principio, con un complicado esquema que consiste en hacerlos chocar entre sí y medir sus velocidades. Pero el método sólo tiene un interés académico y su precisión es muy limitada debido a que los choques, en la vida real, no son perfectamente elásticos.[71] De todos modos, el

esquema de Mach se basa en el axioma de conservación del ímpetu, sin el cual no se podría deducir nada.

Estamos, entonces, ante el hecho de que la fuerza y la masa no se pueden definir en forma independiente entre sí. Están relacionadas por la aceleración, que es un concepto primario asociado al movimiento, pero ninguno de ellos puede tomarse como concepto básico. Se puede definir masa como la razón entre fuerza y aceleración, o definir fuerza como el producto de masa y aceleración.

Al respecto, en un ensayo sobre los fundamentos de la mecánica clásica, Poincaré escribió:[72] "la idea de fuerza es una noción primitiva, irreducible, indefinible; todos sabemos lo que es, tenemos la intuición directa de ella. Esta intuición viene de la noción del esfuerzo, que es familiar desde la niñez". Pero, advirtió, para que una definición de fuerza sea de utilidad, "nos debe mostrar cómo medirla". En consecuencia, analizó varias maneras posibles de medir fuerza o masa, pero se topó con problemas tan insuperables que finalmente admitió el fracaso de cualquier tentativa para definir masa. Por consiguiente, propuso una definición "que no es más que una confesión de impotencia: las masas son coeficientes que conviene introducir en los cálculos". Así, Poincaré bien podría parafrasear la famosa declaración de San Agustín sobre el tiempo: "¿Qué es entonces la masa? Si nadie me pregunta, lo sé; si deseo explicárselo a alguien que me pregunta, no lo sé."

Masa en la física moderna

Como señalamos anteriormente, el concepto de fuerza fue sustituido gradualmente por el de energía, más abstracto, pero más práctico para hacer cálculos. La energía tiene la propiedad importante de ser conservada, lo cual es uno de los principios básicos de la física. Así, de la masa a la fuerza, y de la fuerza a la energía, sólo faltaba un paso adi-

cional para cerrar el círculo de las definiciones. Esto sucedió cuando Planck descubrió la relación entre energía y frecuencia, y Einstein encontró la equivalencia entre masa y energía. El círculo de definiciones sucesivas entonces fue ampliado a tres miembros: masa, fuerza y energía.

A pesar de la falta de una definición precisa, en la práctica el tendero mide la masa de un cuerpo pesándolo en una báscula. Pero cuando se trata de una partícula atómica, su masa debe inferirse a partir de observaciones indirectas. Ni siquiera es posible definirla en términos de la suma de todas las partículas subatómicas que componen un cuerpo, ya que, debido a la equivalencia entre masa y energía, los núcleos atómicos pesan un poco menos que sus partículas constituyentes por separado.

Por lo general, lo que se suele medir en un laboratorio es la razón e/m entre carga eléctrica e y masa inercial m de una partícula. En su experimento clásico de 1897, J. J. Thomson determinó dicha razón a partir de la desviación de los rayos catódicos (electrones, como luego se supo), y encontró que es mil veces mayor que la correspondiente para el hidrógeno ionizado.[73] Sin embargo, su experimento no determinó la masa o la carga por separado del electrón. Esto sólo fue posible unos años después con el experimento clásico de la gota de aceite de R. A. Millikan, quien demostró que la carga está cuantizada, y logró medir su unidad elemental, con lo cual, de paso, encontró el valor preciso para la masa del electrón.

En la práctica, la forma más común de "pesar" una partícula elemental es por medio de la trayectoria visible que deja en una cámara de niebla o burbujas. Esto se puede hacer directamente para una partícula cargada, o indirectamente para una partícula neutra a partir de sus reacciones con otras partículas. Pero, de todos modos, se debe suponer que tal trayectoria obedece las leyes de la electrodinámica clásica. Más precisamente, se toma por válida la fórmula de Lorentz para la fuerza ejercida por un campo electromagné-

tico sobre una partícula clásica, fórmula que involucra la razón entre carga y masa de una partícula, *e/m*, pero no cada uno de estos parámetros por separado.

El experimento de Millikan mostró por primera vez que la carga de las partículas elementales está cuantizada y siempre es igual a un múltiplo entero de la carga del electrón[74] (por lo menos, así parece hasta ahora). Sin esta cuantización sería extremadamente más difícil deducir la masa de una partícula a partir de la observación de su trayectoria, porque la masa no está cuantizada. De todos modos, la masa de una partícula elemental se deduce siempre indirectamente, con base en la electrodinámica clásica.

El concepto de masa es aún más extraño para los cuarks. Los cuarks no se pueden aislar, por lo que no tiene sentido pensar en un cuark colocado en una báscula. No obstante, la masas de los cuarks son parámetros que aparecen perfectamente bien definidos en las ecuaciones de la física cuántica y determinan las interacciones entre hadrones.[75] En realidad, los cuarks se pueden considerar "libres" sólo cuando están lo suficientemente cerca, pero obviamente es imposible pesar un cuark en forma directa.

Otro fenómeno predicho por la mecánica cuántica es la existencia de fluctuaciones cuánticas del vacío. Las partículas pueden aparecer y desaparecer continuamente, sin violar el principio de la conservación de masa, con tal de que sean partículas "virtuales", cuyas vidas son tan cortas que no pueden ser detectadas debido al principio de incertidumbre de Heisenberg para la energía-masa y el tiempo.[76] Por ejemplo, los bosones W y Z, que son cien veces más pesados que un protón, producen las interacciones débiles en un núcleo, pero no agregan ninguna masa adicional porque, en esas circunstancias, son partículas "virtuales": sólo permanecen un tiempo del orden de una millonésima de millonésima de segundo, y el principio de incertidumbre no permite detectarlas.

Aún más extraño es el caso del neutrino, que ilustra cómo la masa se manifiesta en forma extraña en el mundo cuántico. La existencia del neutrino fue confirmada experimentalmente en 1953, y unos años después se descubrió que existen tres clases distintas de esta partícula: el neutrino electrónico, asociado a la materia común de la que estamos hechos, y otros dos tipos de neutrinos, asociados a las partículas *mu y tau*, que pertenecen a otras dos familias de partículas subatómicas. En un principio, el neutrino parecía ser una partícula sin masa, de energía pura al igual que el fotón. Pero en 2001 se comprobó que posee una pequeñísima masa, mucho menor que la de un electrón.

La propiedad más notable del neutrino es que no tiene una masa definida, sino que es la superposición de tres estados con tres masas distintas, lo cual produce que cambien su identidad periódicamente: lo que se llama "oscilaciones de neutrino". Así, un neutrino de una clase determinada posee tres masas distintas. Si diseñamos un experimento para medir su masa, lo encontraremos con una de las tres posibles. ¿Qué pasa, entonces, con el principio de conservación de la masa? ¿Qué sucede con las otras dos masas, aquellas que no observamos? La respuesta, una vez más, está en el principio de incertidumbre de Heisenberg. Si se mide con mucha precisión la masa de un neutrino, aumenta la incertidumbre sobre la posición donde se originó y aquella donde se detectó, lo cual, a su vez, implica una incertidumbre sobre la clase a la que pertenece.

¿Puede un objeto estar en varios estados al mismo tiempo? Eso es lo común en el mundo de los átomos, donde la "realidad" existe sólo como consecuencia de nuestra acción de observar. Como señalamos en el capítulo IV, las partículas atómicas "existen" en una superposición de todos los estados posibles mientras no se observan; es el principio de superposición formulado por Niels Bohr, y que choca con nuestro sentido común, como lo mostró Schrödinger con su famosa paradoja del gato. Al igual que este animal ficticio,

el neutrino puede existir en una superposición de tres masas o de tres tipos.

Siguiendo a Poincaré, deberíamos decir que es cómodo describir al neutrino con tres masas y no con una. Pero no se trata de un truco matemático, sino de un hecho real que tiene consecuencias físicas muy específicas y sujetas a confirmación experimental. Una vez más llegamos a la conclusión de que la masa es un parámetro en las ecuaciones de la física que tiene sentido sólo en el reino de las ideas matemáticas —en contra de lo que dicen los libros de texto.

El mundo de Planck

La relación entre masa, espacio y tiempo se volvió manifiesta con la aparición de la constante de Planck, *h*. Junto con la velocidad de la luz, *c*, es un factor de conversión entre longitud, tiempo y masa en el mundo atómico. En cuanto a la gravedad, ésta también puede entrar en el juego a través de la constante *G* de Newton.

Cuando Max Planck obtuvo su famosa fórmula en la que aparece la constante que ahora lleva su nombre, también se dio cuenta que ésta, combinada con la velocidad de la luz y la constante de la gravitación, podría servir para definir unidades de longitud, tiempo y masa, que serían “independientes de objetos particulares o sustancias, retendrían necesariamente su significado para todos los tiempos y todas las culturas, inclusive extraterrestres y no humanas…”.[77]

Las unidades propuestas por Planck se obtienen combinando *h* y *c* con la constante de la gravitación de Newton. Explícitamente, están dadas por las combinaciones $(hc/G)^{1/2}$, $(hG/c^3)^{1/2}$ y $(hG/c^5)^{1/2}$, para la masa, la longitud y el tiempo, respectivamente.

Nuestras unidades usuales —metro, gramo, segundo— están, en efecto, relacionadas con las escalas humanas, que son accidentes en el planeta Tierra. En cambio, las nuevas

unidades de Planck son realmente naturales, pero adolecen de un serio defecto: no corresponden a nada que conozcamos de la naturaleza: la longitud de Planck es 10^{20} veces más pequeña que el tamaño típico de un átomo y la masa de Planck es 10^{17} veces más grande que la masa típica de una partícula elemental. No obstante, la existencia de tales unidades naturales es una indicación de que longitud, tiempo y masa son las condiciones básicas e irreducibles que hacen posible toda intuición del mundo físico. Otras cantidades físicas pueden reducirse a combinaciones de estas tres cantidades fundamentales, pero éstas son "incondicionadas".

Las unidades de Planck relacionan entre sí la gravedad y la luz —fenómenos propios del mundo macroscópico— con los procesos atómicos cuya escala está determinada por la constante de Planck. En un extremo de la escala, la teoría newtoniana y su generalización einsteiniana describen muy apropiadamente todos los procesos regidos por la gravedad. Pero, en el otro extremo de la escala, la gravedad no tiene ninguna relevancia evidente: en el mundo de los átomos dominan las fuerzas nucleares y electromagnéticas, sujetas a las leyes de la mecánica cuántica. Parecería, entonces, que es en el mundo a la escala de Planck donde se unirían los efectos cuánticos y la gravedad. Pero, a pesar de múltiples intentos, hasta la fecha no se cuenta en forma convincente con una teoría cuántica de la gravedad. Unificar la relatividad general con la mecánica cuántica es todavía el gran sueño de algunos físicos; aunque otros ven con escepticismo los intentos de lograrlo.

Al respecto, vale la pena mencionar que en 1972, Stephen Hawking encontró una curiosa relación entre gravitación y efectos cuánticos: demostró que si se extrapolan directamente las fórmulas básicas de la mecánica cuántica a un espacio-tiempo curvo, resulta que un hoyo negro debe emitir radiación tal como un cuerpo negro a una cierta temperatura. Así, un hoyo negro que no emite de acuerdo con la relatividad general, podría emitir radiación si se toman en

cuenta procesos cuánticos. Una consecuencia es que llegaría un momento en el que un hoyo negro se evaporaría completamente, al transformar toda su masa en energía y radiarla. Sin embargo, el tiempo de vida de un hoyo negro con una masa comparable a la de una estrella es extremadamente largo y equivale a miles de veces la edad del Universo. El efecto de Hawking no produce ningún fenómeno real visible; sólo podría ser relevante para hoyos negros microscópicos, de algunas miles de toneladas, pero no hay ninguna evidencia de que existan. En su momento causó muchas expectativas pues parecía que al fin se había encontrado una relación entre gravedad y procesos cuánticos, pero los desarrollos subsecuentes no condujeron a ningún entendimiento más profundo de ambos fenómenos.

Independientemente de si tiene sentido buscar una teoría cuántica de la gravedad, se puede especular que si el espacio-tiempo es curvo, debería ser, además, extremadamente turbulento en la escala del mundo de Planck. Sería semejante al mar, que parece plano y apacible visto desde una gran altura, pero está agitado por olas y remolinos. Algunos físicos piensan que algo así podría suceder con el espacio-tiempo: en el mundo de Planck, los hoyos negros podrían estarse formando y evaporando continuamente por el efecto de Hawking. El espacio-tiempo sería, entonces, "espumoso" y turbulento.

Hay que aclarar, sin embargo, que todo esto, hasta ahora, no es más que el resultado de extrapolaciones sin fundamento hasta límites del todo desconocidos. Cuando los físicos hablan de medir el tiempo que dura un cierto proceso atómico, en realidad se refieren a calcular ese tiempo indirectamente a partir de ciertos fenómenos atómicos que involucran a la luz. Más precisamente, miden la energía de las partículas de luz emitida por los átomos, y esa energía la relacionan indirectamente con distancias y tiempos. En el mundo atómico, como lo hemos señalado a lo largo de este texto, el espacio y el tiempo no tienen el sentido que les da-

mos comúnmente, así que no está nada claro que las extrapolaciones temerarias hasta el mundo de Planck puedan justificarse algún día.

Teoría de campos cuánticos

En cuanto al origen físico de la masa, éste sigue siendo uno de los grandes problemas de la física moderna. Sólo la Teoría de Campos Cuánticos (TCC) intenta dar una explicación parcial de la masa en términos de algo que parece ser más fundamental: el campo. En la física moderna, el campo es la sustancia fundamental del mundo: se describe por medio de una función que depende de las variables espacio-temporales, asociando una cantidad matemática a cada punto del espacio de cuatro dimensiones (generalizaciones a dimensiones más altas, como en la teoría de supercuerdas, también han sido exploradas). Las partículas elementales se interpretan como vibraciones de un campo; la energía de estas vibraciones está cuantizada y cada cuanto de energía se identifica con una partícula elemental.

En la física moderna, el campo, y no la masa, se ha vuelto el sustrato del mundo material, la última realidad irreducible, algo semejante a la sustancia para los filósofos clásicos. Al respecto, Einstein escribió en 1953:[78]

> El concepto de objetos materiales fue reemplazado gradualmente, como concepto fundamental de la física, por el de campo. Bajo la influencia de las ideas de Faraday y Maxwell, se desarrolló la noción de que quizás toda la realidad física se podría representar como un campo cuyos componentes dependieran de los cuatro parámetros del espacio-tiempo.

El campo es una función matemática que se mide en unidades de energía (o masa). Así, la energía-masa está relacionada indisolublemente con el campo ya que lo provee de una dimensión.

Por otra parte, vale la pena señalar que las ecuaciones fundamentales de la TCC contienen parámetros constantes que se identifican con las masas de las partículas elementales: pero estos parámetros ni siquiera son observables. ¡Las

masas que aparecen en las ecuaciones de campo se interpretan como masas “desnudas”, que deben ser multiplicadas por algunos coeficientes numéricos —¡formalmente infinitos!— para obtener lo que se llama una “masa renormalizada”, esto es, una masa que es medida experimentalmente. A pesar de su completa falta de rigor matemático, la TCC es en la actualidad la descripción más precisa de la naturaleza que se haya logrado, lo cual es todo un misterio. Se trata de un buen ejemplo de lo que Eugene Wigner llamó alguna vez “la irrazonable eficiencia de las matemáticas”.[79]

¿Masa matemática?

Consideremos ahora el concepto de masa en el contexto de la descripción matemática. En la física teórica se utilizan ecuaciones diferenciales que describen la evolución espaciotemporal de las funciones que representan las propiedades dinámicas de un sistema; tanto en la mecánica newtoniana como en la TCC, estas funciones pueden ser la posición y la velocidad de un cuerpo en el primer caso, y diversos campos en el segundo.

Algunos físicos del siglo XX soñaron con reducir todas las ecuaciones de la física a fórmulas que contuvieran sólo números puros —es decir, dimensionales—, o cuando mucho, que se escribieran en términos de las unidades de Planck y quizás unos pocos parámetros adicionales. Así, por ejemplo, podría conjeturarse que la masa del electrón se podría expresar como la masa de Planck multiplicada por algún factor numérico, y que este factor debería salir de una teoría fundamental. Una dificultad práctica con un programa de estas características es que la masa de Planck es unos dieciséis órdenes de magnitud más grande que la masa típica de un objeto atómico; pero aun así, se podría alegar que los números muy grandes también resultan de argumentos puramente teóricos.

Como una curiosidad histórica, vale la pena mencionar que Arthur Eddington, el fundador de la astrofísica moderna, tomó tal programa muy en serio. Eddington[80] creía que los números adimensionales que aparecen en la física podrían deducirse de argumentos puramente matemáticos. Así, por ejemplo, trató de obtener la llamada constante de estructura fina (que está relacionada con la carga eléctrica del electrón)[81] con base en oscuros argumentos y llegó a la conclusión de que es el inverso de un número entero exacto: 137 (mediciones posteriores más precisas dieron un valor de 137.035…). En la actualidad, ningún físico tomaría en serio un programa así, pero todavía queda la esperanza de que al menos algunas constantes fundamentales se puedan derivar de una teoría más general.

Examinemos entonces el problema desde la clara perspectiva del lenguaje matemático. Para empezar, notemos que los objetos físicos se describen con cantidades dinámicas expresadas como funciones de las coordenadas espacio-temporales. Éstas son las variables *a priori* que debemos aceptar en cualquier descripción de los fenómenos físicos. Además, tenemos variables dinámicas como fuerza, energía, impulso, ímpetu angular, etc., que incluyen necesariamente la masa —o, equivalentemente, la energía— como un factor en sus unidades, y lo mismo vale para las variables de la teoría cuántica de campos.

¿Es posible, entonces, obtener todos los parámetros fundamentales de la física a partir de argumentos puramente matemáticos? Tal programa, que encuentra sus orígenes remotos en Pitágoras y su visión del mundo basado en puros números —de la cual la teoría de Eddington podría verse como una versión moderna—, es una pura ilusión. Por ejemplo, el Modelo Estándar de las partículas elementales, que con tanto éxito describe los fenómenos subatómicos, contiene nada menos que dieciocho parámetros. Uno de éstos es la masa de la hipotética partícula de Higgs, que todavía no ha sido descubierta (en el momento de escribir esto). Se han

propuesto teorías más generales, como la Gran Unificación, que intenta unificar las interacciones básicas entre partículas y explicar los valores de algunas constantes naturales. También contamos con la teoría, aún más fundamental, de las “supercuerdas” o su versión más reciente, la “teoría M”. Pero todas ellas presuponen la existencia de las unidades de Planck. En el caso más ideal, una teoría absolutamente fundamental debería contener por lo menos un parámetro adicional, tal como, quizás, la tensión de una supercuerda. Pero una teoría enteramente libre de parámetros es un sueño imposible.

Así, llegamos a la conclusión de que la física teórica, en su formulación matemática de las leyes de la física y su descripción de los fenómenos naturales, debe recurrir a la síntesis del espacio y el tiempo con un tercer concepto, dado *a priori*, que aparece en múltiples formas: masa, energía, fuerza o campo.

Permanencia de la materia

¿Cómo puede un filósofo pesar el humo? Para Kant, la respuesta es simple: “Sustráigase del peso de la madera quemada el peso de las cenizas remanentes, y se tendrá el peso del humo.” Pero Kant aclara que, con tal razonamiento, se está recurriendo al *principio de permanencia*, según el cual “en todo cambio de apariencias, la sustancia permanece” y su cantidad no se altera. Dicho de otro modo: nada surge de la nada. Sin este principio que debemos aceptar *a priori*, sería imposible entender el mundo y darle coherencia a nuestras percepciones.

Desde el punto de vista de la física moderna, la proposición de Kant es correcta, a condición de precisar los términos utilizados. En la actualidad, diríamos que al quemarse la madera, sus moléculas reaccionan con el oxígeno de la atmósfera y liberan la energía química que mantenía unidos

sus átomos, sin que se altere el número de éstos. En otras palabras, la masa y la energía se conservan.

Kant describió el principio de la conservación de la sustancia como "analogía de la experiencia". Con respecto a la masa, su ejemplo del peso del humo se basa en la presuposición de que "la materia (sustancia) no desaparece, pero sufre una modificación de forma" (B 228). Esto, sin embargo, sólo puede saberse *a priori*, a partir de un principio de permanencia.

Los filósofos clásicos llamaron "sustancia" al elemento fundamental y permanente del mundo. Según Kant, es necesario "presuponer su existencia a través de todos los tiempos" (B 228), ya que "la unidad de la experiencia nunca sería posible si estuviésemos dispuestos a aceptar que cosas nuevas, es decir, sustancias nuevas, pudiesen adquirir existencia" (B 229). Pero, como mencionamos más arriba, la sustancia no tiene ya ningún lugar en la física moderna como sustrato del mundo material; esa función le corresponde ahora al campo. En cuanto a la materia, aparece como una percepción de masa o fuerza, pero Kant no consideró a la masa como una forma pura de intuición; en esto es muy explícito: "la posibilidad de la síntesis del predicado 'peso' con el concepto 'cuerpo'... se basa en la experiencia" (B 12).

Por lo que respecta al principio de la permanencia, hoy en día los físicos se refieren más bien a la conservación de la energía-masa. Si bien este principio físico está plenamente aceptado, se sustenta en la experiencia y carece, por ello, de "estricta universalidad y certeza apodíctica", tal como exigía Kant de un concepto *a priori*. Pero, ¿podemos hablar entonces de un principio de conservación independiente de la experiencia? Tal parece que sí: supongamos que algún día se descubriera un fenómeno físico en el que la energía-masa no se conservara; en ese caso, los físicos buscarían algún otro principio más general que implicara la conservación de alguna cantidad, ya que, de otra forma, sería imposible hacer cualquier predicción teórica. Dicho de otro modo, se

tendría que apelar, de todos modos, al principio de permanencia por ser éste *a priori*, para lo cual habría que construir una teoría física más general.

De hecho, es muy ilustrativo que el principio de conservación de la masa-energía haya llegado a ser cuestionado muy seriamente. Alrededor de 1930, se conocían bastante bien los fenómenos relacionados con la radiactividad de los núcleos atómicos y, en particular, el llamado "decaimiento beta", proceso por el cual un núcleo radiactivo emite un electrón y se transmuta en el siguiente elemento en la tabla periódica. Pero, al medir la energía de los electrones liberados y la de los núcleos remanentes, los físicos descubrieron que faltaba casi la mitad de la energía que debería estar ahí.

Niels Bohr propuso entonces abandonar valientemente el principio de conservación de la masa-energía a escala atómica y suponer que sólo se aplica a gran escala, en forma estadística. En cambio, Wolfgang Pauli era de la opinión de que ese principio debía ser válido en todas las circunstancias, y propuso que el resultado aparentemente contradictorio del decaimiento beta se debía a que, además del electrón, el núcleo emite otra partícula, casi imperceptible, que se lleva una buena parte de la energía.

Resultó que, en efecto, existe tal partícula: es el neutrino, cuya interacción con la materia es tan débil que puede atravesar millones de años luz de plomo sin ser absorbido. Pauli siguió el razonamiento del hipotético filósofo de Kant, mencionado al inicio de este apartado: en lugar de humo, pesó una partícula fantasma. El principio de permanencia le dio su coherencia al mundo atómico.

En este caso, la unidad de la experiencia, postulada por Kant, no sólo fue preservada sino que dio lugar al descubrimiento de un nuevo componente del mundo. Pero si Bohr hubiera tenido razón en aquella ocasión, se habría abierto la posibilidad de tener una nueva física, basada en el principio de permanencia de algo más general que la masa-energía. El punto importante es que, con base en la experiencia, es im-

posible descartar por completo una violación de un principio físico de conservación, pero de ocurrir algo así sería indicio de fenómenos nuevos.

Conclusiones

En las ecuaciones que describen los fenómenos físicos, es posible eliminar todas las unidades de las variables dinámicas, menos las tres unidades básicas: longitud, tiempo y masa (o equivalentemente energía). Una reducción adicional no es posible. Esto recuerda lo que dijo Kant acerca del tiempo, como una forma pura de intuición: "Las apariencias pueden, todas, desaparecer; pero el tiempo mismo (como la condición universal de su posibilidad) no puede quitarse" (B 46).

Pero algo semejante puede decirse de la energía-masa. Ningún objeto se puede representar sin el espacio, el tiempo y la masa. En la física moderna, es imposible imaginar cualquier parte del espacio desprovista de energía. Incluso el vacío está repleto de fluctuaciones de origen cuántico, que son perfectamente reales ya que producen efectos bien establecidos.

En *Espacio-tiempo-materia*, publicado poco después de la aparición de la teoría de la relatividad general, Weyl escribió en un espíritu kantiano:[82] "*Espacio y tiempo* son considerados comúnmente como formas de existencia del mundo real, la *materia como su sustancia*... Es en la idea compuesta del *movimiento* que estas concepciones fundamentales entran en relación íntima."

Sin embargo, el concepto del movimiento no tiene sentido en la física cuántica, donde ha sido sustituido por conceptos más pragmáticos como "transiciones entre niveles de energía". Es cierto que la teoría de la relatividad reveló "la amalgamación del Espacio y el Tiempo", en palabras de Weyl, pero la conexión entre ellos es la velocidad de la luz; del

mismo modo, la constante de Planck relaciona la energía con el espacio-tiempo en el mundo atómico.

Una medición de distancia o tiempo en la física moderna es siempre en términos de la energía. En la actualidad, la unidad de tiempo se define en términos del número de oscilaciones de una microonda con una energía que corresponde exactamente a una cierta transición atómica en un átomo de cesio, y la unidad de longitud se define como la distancia recorrida por la luz en una cierta fracción de segundo. Así, lo que se mide realmente no es el espacio y el tiempo, sino la diferencia de energía entre dos niveles atómicos, en combinación con la velocidad de la luz y la constante de Planck. En el mundo atómico, el espacio y el tiempo, en cuanto parámetros medidos, son indistinguibles de la energía, que es, a su vez, una manifestación de la masa. Así, el espacio y el tiempo, formas de la intuición, se entrelazan en el mundo atómico, con la masa o energía masiva.

Un siglo después de Poincaré, todavía no hay una definición de masa, energía, o fuerza. (En la vida real, la masa se ha definido en términos de una muestra que se guarda en el pabellón de Sèvres, pero esto es de poca utilidad para pesar partículas elementales.) Longitud, tiempo y masa son parámetros en las ecuaciones básicas de la física, a pesar de lo cual los físicos utilizan estos conceptos con mucho éxito. La conclusión es que se necesita no una definición precisa de cada concepto físico, sino coherencia y consistencia en toda teoría matemática que pretenda describir la naturaleza. Esta coherencia, sin embargo, no puede encontrarse *a posteriori,* sino *a priori* en nuestras teorías matemáticas de la naturaleza.

[70] M. Jammer, *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*, Harvard University Press, 1961.

[71] *Idem.*

[72] H. Poincaré, *La science et l'hypothèse*, Flammarion, París, 1968.

[73] La explicación moderna es que el protón (o, lo que es lo mismo, hidrógeno ionizado) pesa 982 veces más que el electrón.

[74] O un tercio de esa carga para los cuarks (véase más adelante).

[75] Las partículas que constituyen la materia se dividen en hadrones y leptones. Los primeros están hechos de cuarks: los bariones, como el protón o el neutrón, constan de tres cuarks; los mesones, como el pión, constan de un cuark y un anticuark. El electrón y el neutrino son leptones.

[76] Si ΔM es la incertidumbre en la masa de una partícula, y Δt la incertidumbre en el tiempo durante el cual posee esa masa, entonces el producto $\Delta Mc^2\Delta t$ debe ser mayor que h.

[77] M. Planck, citado en M. J. Klein, *Physics Today* 19: 23, 1966.

[78] A. Einstein, prólogo a M. Jammer, *Concepts of Space*, Harvard University Press, 1954.

[79] E. Wigner, *Communications on Pure & Applied Mathematics*, vol. XIII, 1, 1960.

[80] A. S. Eddington, *Fundamental Theory*, Cambridge University Press, 1948.

[81] La constante de estructura fina, así llamada por razones históricas, es la combinación , donde e es la carga del electrón, y es un número puro: no depende del sistema de unidades utilizado.

[82] H. Weyl, Space, *Time, Matter*, Dover, 1922.

X. El universo

> Dije “apretados como anchoas” más bien para usar una figura literaria: en realidad no había espacio ni siquiera para apretarse. Cada punto de cada uno de nosotros coincidía con cada punto de cada uno de los otros en un punto único…
>
> Italo Calvino, *Las cosmicómicas*

A principios del siglo XX no se tenía una idea, ni remotamente correcta, del tamaño del Universo. Los astrónomos debatían sobre la naturaleza de las nebulosas y la distancia a la que se encuentran, hasta que, finalmente, Edwin Hubble determinó las verdaderas dimensiones cósmicas y descubrió, además, que el Universo está en expansión. Aun así, la cosmología siguió siendo mucho tiempo una ciencia altamente especulativa, basada en observaciones debatibles y unos cuantos datos poco precisos. Pero en las últimas décadas del siglo XX, nuestra concepción del Universo comenzó a sufrir un cambio radical gracias al avance extraordinario de las técnicas de observación astronómica, y la cosmología pudo adquirir el carácter de ciencia exacta.

Todas las evidencias obtenidas por los satélites y los grandes telescopios tienden a reforzar la teoría de la Gran Explosión (*Big Bang*, en inglés). Empero, hay que recordar que la astronomía, a diferencia de otras ciencias, se basa en la observación e interpretación de los fenómenos cósmicos, sin la posibilidad de realizar experimentos para confirmar las hipótesis; ni siquiera se puede medir directamente el espacio cósmico. La meta de la cosmología consiste, entonces, en construir una teoría coherente del Universo que explique en forma unificada todas las observaciones; esto es lo que se ha logrado en gran medida con la teoría de la Gran Explosión, y es la razón por la que ha sido aceptada tan ampliamente.

Medir el Universo

Para los pueblos de la Antigüedad, el Universo era esencialmente lo que rodeaba la Tierra y no parecía extenderse mucho más allá de las nubes. Era un mundo a escala terrestre, acotado por la bóveda celeste, en el cual los hombres ocupaban un lugar central.

La idea de la Tierra esférica empezó a ser aceptada en Grecia, en la época de Platón y Aristóteles. En el siglo II a. C., Eratóstenes logró medir el radio de la Tierra con un ingenioso método que consistía en comparar las sombras en las ciudades egipcias de Siena y Alejandría: el valor que obtuvo fue muy cercano al correcto. Por esa misma época, Hiparco calculó la distancia a la Luna midiendo el tiempo que tarda nuestro satélite en atravesar la sombra terrestre durante un eclipse: dedujo que esa distancia equivale a $60^5/_6$ radios terrestres, lo cual es un excelente resultado comparado con el valor correcto de 60.3. También intentó Hiparco medir la distancia al Sol, pero su método no era suficientemente preciso y obtuvo un valor diez veces inferior al real. En conclusión, los griegos en esa época ya tenían una idea bastante correcta del tamaño de la Tierra y la distancia a la Luna, pero situaban al Sol demasiado cerca. En cuanto a las estrellas, su verdadera ubicación habría de seguir siendo un misterio por muchos siglos más.

Uno de los argumentos más fuertes en contra del sistema heliocéntrico de Copérnico era que las estrellas no mostraban ninguna paralaje. Si la Tierra efectivamente se mueve alrededor del Sol, la posición de las estrellas debería cambiar a lo largo del año, tal como varía la posición aparente de un objeto lejano desde un vehículo en movimiento. Hoy en día, sabemos que las estrellas muestran una paralaje, pero ésta es tan pequeña que sólo es perceptible para las más cercanas. La primera medición exitosa de la paralaje de una estrella se realizó en 1838, lo cual permitió determinar su distancia por triangulación con el diámetro de la órbita terrestre; desde entonces, el método se ha podido aplicar a un centenar de estrellas cercanas al Sol.

En el siglo XVII, ya con el sistema heliocéntrico bien establecido, los astrónomos habían aceptado la idea de que el Sol debía ser una estrella más, que se ve mucho más brillante sólo por su cercanía. Con base en este hecho, Christian Huygens intentó medir la distancia a Sirio, comparando su brillo con el del Sol para determinar sus distancias relativas. Suponiendo que los dos astros son del mismo brillo intrínseco, calculó que Sirio debería estar unas 28 mil veces más alejado de nuestro planeta que el Sol. Tal distancia no dejó de maravillarlo, a pesar de que era veinte veces menor que la verdadera.

El método utilizado por Huygens es básicamente el único del que disponen los astrónomos para determinar las grandes distancias cósmicas. Se trata de comparar el brillo aparente de un objeto lejano con su brillo real, para así deducir su distancia a partir de una ley simple: la luminosidad aparente disminuye conforme al cuadrado de la distancia. Por supuesto, para aplicar este método se debe conocer con suficiente precisión el brillo real: éste es el verdadero problema de la medición de distancias en astronomía.

Afortunadamente, los astrónomos han descubierto que existen varias clases de estrellas y pueden ser clasificadas, de tal forma que es posible deducir sus luminosidades intrínsecas con bastante precisión según la categoría a la que pertenecen. Por ejemplo, existe un tipo de estrellas llamadas "cefeidas" con la propiedad de variar su luminosidad en forma periódica, y el periodo, que es fácil de medir, determina justamente el brillo intrínseco. Así, empezando con estrellas cercanas, las distancias se han podido establecer para estrellas cada vez más lejanas, en una cadena cósmica que alcanza... las galaxias.

Con el invento y uso de los telescopios, los astrónomos descubrieron que existen en el cielo, además de estrellas y planetas, unos objetos luminosos con formas indefinidas y extendidas: las llamaron nebulosas. En uno de sus trabajos de juventud, Kant había propuesto la hipótesis de que las

nebulosas con forma elíptica son conglomerados de millones de estrellas, semejantes a nuestra propia Vía Láctea, mantenidas en equilibrio por su propia gravedad y aceleración centrífuga, tal como los planetas alrededor del Sol, pero la propuesta no podía confirmarse con los medios disponibles en su época.

Si el Universo se restringe a nuestra galaxia, la Vía Láctea, o si las nebulosas son objetos que se localizan fuera y lejos de ésta, fue tema de ardientes discusiones entre los astrónomos hasta los descubrimientos de Hubble. Con el telescopio de un metro de diámetro del observatorio de Monte Wilson, en California, el más grande del mundo en esa época, Hubble tomó fotografías de la nebulosa de Andrómeda en las que se apreciaba claramente que estaba compuesta de multitud de estrellas. Pero, además, Hubble identificó entre ellas estrellas cefeidas, y pudo así deducir su distancia: Andrómeda resultó estar alejada dos millones de años luz. No quedó duda de que se trataba de un cuerpo situado fuera de nuestra Vía Láctea.

Ahora sabemos que muchas de las nebulosas son en realidad conglomerados de miles de millones de estrellas: lo que ahora llamamos galaxias. Hubble logró medir la distancia a varias galaxias cercanas, identificando primero cefeidas en ellas; y, en un siguiente paso, tomando como referencia las grandes nubes de gas ionizado que tienen más o menos el mismo brillo en todas las galaxias espirales. Para las más lejanas, notó que las galaxias suelen agruparse en cúmulos de galaxias, en los que destaca siempre una gigante con forma elíptica, cuyo brillo intrínseco es aproximadamente el mismo en todos los casos. De ese modo, Hubble fue capaz de establecer, aunque sea en forma aproximada, las dimensiones cósmicas: la imagen del Universo que obtuvo rebasaba ampliamente todo lo concebible en sus tiempos.

Siguieron más sorpresas. Los astrónomos pueden determinar la composición de las estrellas y galaxias a partir de un análisis espectral de la luz que emiten. En general, la luz,

al pasar por un prisma, revela, sobrepuestas a los colores del arco iris, una serie de rayas brillantes u oscuras, que son producidas por los átomos y que permiten identificar cada elemento químico por su posición en el espectro. Cuando Hubble estudió la luz de las galaxias, descubrió el hecho inesperado de que todas muestran las rayas sistemáticamente corridas hacia el lado rojo del espectro. Esto, de acuerdo con el efecto Doppler,[83] implica que las galaxias se alejan de nosotros. Pero, además, cuando Hubble comparó la velocidad de recesión con la distancia, descubrió una relación directa entre las dos: a mayor distancia, mayor velocidad. La conclusión más evidente es que el Universo está en plena expansión, tal como lo habían predicho los modelos de Friedmann unos años antes.[84]

La Gran Explosión

Si el Universo realmente está en expansión, su densidad en el pasado tuvo que ser mucho mayor que ahora. Si nos remontamos mentalmente hacia atrás en el tiempo, llegaremos a una situación en la que la densidad de materia cósmica era prácticamente infinita; ése sería el momento que podemos tomar como el nacimiento del Universo y el principio del tiempo: *la Gran Explosión.*

Con base en los descubrimientos de Hubble y la relatividad general de Einstein, George Lemaître elaboró la teoría del "átomo primordial", según la cual el Universo habría empezado a expandirse a partir de un estado de gran densidad. A fines de los años cuarenta, George Gamow formuló una versión más refinada de esta hipótesis, al proponer que el Universo en el remoto pasado era mucho más caliente. El propósito original era explicar la formación de los elementos químicos por medio de reacciones nucleares que requieren muy altas temperaturas; la idea no funcionó para ese propósito, Gamow predijo que la temperatura cósmica ha-

bría bajado en la actualidad a unos cuantos grados sobre el cero absoluto, lo cual se manifestaría como una radiación de microondas proveniente uniformemente de todas las regiones del Universo.

Esa radiación fue descubierta por A. Penzias y R. Wilson en 1965 en forma más bien accidental.[85] Originalmente, sólo la midieron en una longitud de onda de radio muy específica, pero las observaciones subsecuentes confirmaron todos los detalles, tal como predice la teoría.

La explicación más natural es que, durante los primeros 300 milenios, la temperatura del Universo era tan alta que la materia se encontraba en estado de plasma (gas ionizado, compuesto de núcleos atómicos y electrones libres): el Fuego Primordial. Debido a que el plasma (o fuego) no es transparente, la luz, en esas épocas, no podía propagarse libremente. Pero cuando la temperatura cósmica bajó a unos 5 mil grados, se pudieron formar los primeros átomos y el Fuego Primordial se apagó: en ese momento, el Universo se volvió transparente. En la actualidad, observamos el Fuego Primordial como un fondo cósmico, distribuido por todo el cielo y alejándose a casi la velocidad de la luz debido a la expansión cósmica. La radiación que emitió por última vez, cuando se apagó, la recibimos con mucho menos energía debido al efecto Doppler: en forma de microondas.

Con el desarrollo reciente de las técnicas de observación, se ha podido medir la radiación cósmica con una enorme precisión. Así, la temperatura actual del Universo se sitúa en 2.73 grados kelvin. Además, la radiación de fondo es prácticamente homogénea a gran escala, pero se han logrado medir pequeñísimas variaciones de temperatura, del orden de diezmilésimas de grado, que corresponden a regiones del Fuego Primordial donde empezaron a formarse las galaxias. Tales variaciones coinciden muy bien con las predicciones teóricas y pueden dar indicaciones muy precisas sobre las propiedades del Universo.

Si nos vamos aún más atrás en el tiempo, la teoría predice que durante los primeros segundos, la temperatura ambiente era de billones de grados; en esas condiciones, los núcleos atómicos chocaban violentamente unos con otros, y las reacciones nucleares producían y destruían continuamente núcleos de hidrógeno, helio y otros elementos. Los cálculos indican que unos tres minutos después de la Gran Explosión, la temperatura había bajado a mil millones de grados, justo cuando el helio representaba un 25% de la masa cósmica y casi todo el resto era hidrógeno, con apenas una traza de otros elementos.[86] Esa proporción se mantuvo subsecuentemente, ya que, al seguir bajando la temperatura, ya no pudieron producirse las reacciones de fusión nuclear que destruyen el helio. Lo importante es que la proporción predicha teóricamente corresponde muy bien con las estimaciones astronómicas de cuál fue la abundancia primordial de helio, antes de que empezaran a formarse las galaxias. Ésta es una de las pruebas más sólidas a favor de la teoría de la Gran Explosión.

El Universo plano

Las matemáticas nos ofrecen una amplia gama de universos posibles. Sin embargo, para saber en qué clase de universo vivimos, no queda más que recurrir a las observaciones astronómicas. En la actualidad, el universo que Einstein inicialmente imaginó, estático, inmutable, sostenido por una fuerza de repulsión cósmica del todo *ad hoc* para no colapsarse, ya no tiene ningún sustento astronómico.

Los parámetros básicos del Universo que se pueden deducir a partir de las observaciones astronómicas son la constante de Hubble —que fija la relación directa entre velocidad de recesión y distancia de una galaxia—, la desaceleración cósmica —desviación a muy grandes distancias con respecto a la ley lineal de Hubble—, la densidad total de masa cósmi-

ca y la temperatura actual. En los últimos años, gracias al gran desarrollo de las técnicas de observación, se han logrado tener mediciones de gran precisión; todas son consistentes con un universo en expansión, pero totalmente plano.

Más específicamente, los datos astronómicos, en combinación con los cálculos teóricos, fijan la edad del Universo en unos 13 mil 700 millones de años (con un error no mayor que unos 200 millones de años), y el momento en el que se apagó el Fuego Primordial en unos 380 mil años después de la Gran Explosión. Además, resulta que el Universo, a escala cósmica y en promedio, es espacialmente plano, es decir, que no se curva sobre sí mismo.[87] Sin embargo, para ajustar todos los datos a las predicciones teóricas, los cosmólogos tienen que recurrir a la "constante cosmológica" que Einstein se había arrepentido de haber introducido en sus fórmulas. Este hecho es consistente con el descubrimiento reciente, basado en el estudio de supernovas en galaxias lejanas, de que el Universo parece acelerarse a muy grandes distancias, en lugar de desacelerarse: justamente como si hubiera una repulsión gravitatoria a escala cósmica.

Como mencionamos en el capítulo VI, Einstein y De Sitter concibieron dicha constante como una propiedad intrínseca del espacio:[88] en la actualidad, los cosmólogos tienden a interpretarla más bien como una propiedad del vacío cuántico. En el mundo subatómico, el "vacío" está repleto de partículas que se crean y destruyen continuamente en un tiempo tan corto que es imposible detectarlas.[89] El problema es que, estrictamente hablando, dicha energía debería ser infinita, mientras que, por otra parte, las observaciones astronómicas indican que debe ser distinta de cero, pero muy pequeña. ¿Cómo reconciliar esas dos estimaciones, diametralmente opuestas? Hasta ahora, no se tienen más que hipótesis sin justificaciones claras.

Otra pieza del rompecabezas cósmico que no acaba de encajar es la densidad de masa. Un universo plano debería contener más masa que la observada, pero la densidad de

materia visible, aquella que se encuentra formando estrellas y galaxias, representa apenas un 4 por ciento de la necesaria para que el Universo sea tan plano como parece ser. Según los modelos teóricos, el resto debe consistir en un 23 por ciento de “materia oscura”, cuya composición es tema de especulaciones, y un 73 por ciento de “energía oscura”, asociada a la repulsión cosmológica, cuya naturaleza es aún más oscura.[90]

La teoría de la Gran Explosión tiene el mérito indiscutible de que explica en una forma coherente los hechos básicos de la cosmología moderna, pero su debilidad radica en tener que postular masas y energías “oscuras” para ajustar los datos; éste es el gran problema no resuelto de la cosmología moderna.

Sea lo que fuere, el hecho es que la idea original de Einstein de un universo cerrado sobre sí mismo, que resolvía el dilema de la finitud sin límites, ya no se sostiene. Estamos situados otra vez en un universo plano, aparentemente infinito; la única diferencia es que ahora sabemos que se expande. Más que la superficie de un globo que se infla, el Universo semeja una plancha de hule que se estira.

Tiempo cero e inflación

Si aceptamos la idea de que el Universo “nació” hace unos catorce mil millones de años, también debemos aceptar que el tiempo tuvo un comienzo. Pero, ¿cómo definir el cero del tiempo? Para entender el origen del Universo, se necesitaría una teoría que pudiera explicar el comportamiento del espacio-tiempo en condiciones de curvatura extrema y de la materia a densidades nucleares y mayores, cuando dominaban los efectos tanto cuánticos como gravitatorios. Pero una teoría cuántica de la gravedad es todavía un sueño, cuya realización ni siquiera es obvia.

En espera de que aparezca una unificación conceptual de la gravitación y la mecánica cuántica, se puede especular sobre los límites de validez de la relatividad general, que es la base teórica de la Gran Explosión. Como señalamos en el capítulo anterior, los limites que se aceptan comúnmente están fijados por las unidades de Planck: se presume que la teoría de Einstein es válida para longitudes, tiempos y masas mucho mayores que los de Planck.

Afortunadamente, se trata de límites muy generosos, a tal punto que los cosmólogos no resisten la tentación de describir al Universo cuando su edad apenas excedía el tiempo de Planck. En cambio, aceptan ampliamente que las condiciones anteriores al tiempo de Planck, unos 10^{-44} segundos, están fuera del campo de aplicación de la física moderna y que, por lo tanto, no tiene sentido hablar de un cero del tiempo cósmico. Cuando mucho, se puede decir que la descripción física del Universo podría empezar al tiempo de Planck. En ese tiempo, la temperatura cósmica debió ser de unos 1032 grados centígrados, que es la temperatura asociada a la energía de Planck.[91]

Otro hecho afortunado es que los conocimientos actuales sobre el mundo de las partículas subatómicas permiten remontarse mentalmente hasta los instantes iniciales del Universo, construyendo, en una osada extrapolación, una imagen bastante plausible de lo que pudo suceder a partir del tiempo de Planck. En este contexto, se recurre a la llamada teoría de la Gran Unificación, según la cual las interacciones fundamentales de la naturaleza —nucleares y electromagnéticas— se vuelven una sola y única entre partículas elementales con energías extremadamente grandes. La energía necesaria para la hipotética Gran Unificación está totalmente fuera del alcance de los laboratorios terrestres, pero la teoría conduce a una serie de predicciones cosmológicas que podrían comprobarse en el futuro. El Universo en su conjunto puede tomarse como un inmenso laboratorio en el que se dispone, literalmente, de toda la energía posible; de

ahí la interacción fructífera entre cosmología y física de partículas elementales que se ha presenciado en los últimos años.

El modelo del *universo inflacionario*, que complementa la teoría de la Gran Explosión, ofrece un escenario posible de lo que pudo ser el principio cósmico. Según este modelo, en el principio era el *campo* (algo así como energía repartida en todo el espacio); luego, de acuerdo con las predicciones de la Gran Unificación, cuando la edad cósmica llegó a 10^{-32} segundos y la temperatura bajó a unos 10^{27} grados, las interacciones nucleares se separaron de las otras, lo cual se manifestó en una liberación de energía tan grande que el Universo se infló aumentando su tamaño un quintillón de veces en sólo 10^{-32} de segundo.

Antes de la inflación, debió haber exactamente tantas partículas como antipartículas, aunque sería más correcto hablar de campos en lugar de partículas. Sin embargo, como vimos en el capítulo IV, existe una ligera asimetría, confirmada experimentalmente, entre las reacciones que involucran partículas y antipartículas. Si el escenario descrito es correcto, durante la inflación se pudo producir el ligerísimo exceso de materia sobre antimateria debido a la asimetría CP, la cual se mantuvo posteriormente. Un segundo después de la Gran Explosión, cuando la temperatura bajó a mil millones de grados, todas las antipartículas se aniquilaron con sus partículas correspondientes, y quedó sólo el ligero exceso de partículas de materia común.

El modelo inflacionario tiene el mérito de explicar varias propiedades del Universo en forma coherente. Por ejemplo, el hecho de que el Universo tiene esencialmente la misma apariencia en todas las direcciones se explica de la siguiente forma: durante el periodo de la inflación, regiones cósmicas que estaban prácticamente en contacto, se encontraron súbitamente en extremos opuestos del universo. Todo nuestro universo visible estuvo, antes de la inflación, concentrado en una región de sólo unos cuantos centímetros de radio.

Esto explica, asimismo, por qué el Universo parece ser tan plano; la razón es que se “infló” bruscamente, tal como un globo que, inflado a tamaños desproporcionados, adquiere una superficie prácticamente plana.

Todo lo anterior puede sonar muy especulativo, pero esta historia del Universo es la que se deduce de las teorías matemáticas que describen a las partículas del mundo atómico. Se trata de extrapolaciones extremas, pero plausibles, de nuestras teorías físicas, y permiten asomarnos, gracias a las matemáticas, a lo que pudieron ser los instantes iniciales del Universo. Por supuesto, no había testigo de ello: nuestras inferencias son obviamente indirectas.

Cabe preguntar, por último, si tiene sentido hablar de tiempos tan extremadamente cortos. La respuesta es que, en realidad, más que intervalos de tiempo, se trata de energías: recordemos que en el mundo cuántico, el tiempo está asociado a la energía por medio de la constante de Planck: existe una relación recíproca entre tiempo y energía. Cuando una partícula posee una energía extremadamente alta, tal como debió ser la situación en el Universo temprano, su escala de tiempo tuvo que ser, en consecuencia, extremadamente corta. Más que de tiempos cortos, estamos hablando de energías extremadamente grandes.

Otras cosmologías

En la actualidad la mayoría de los cosmólogos acepta la idea de un Universo en plena evolución. ¿Implica la expansión cósmica necesariamente que el Universo haya tenido un principio? La respuesta no tiene que ser necesariamente afirmativa. Al respecto, Fred Hoyle propuso, en los años cincuenta, la teoría del Estado Estacionario, según la cual el Universo nunca tuvo un principio y siempre fue igual por toda la eternidad... a pesar de que se expande. Para reconciliar expansión con densidad constante, Hoyle hizo la hipó-

tesis de que se crea continuamente materia de la nada, de forma tal que la densidad del Universo se mantiene eternamente la misma. ¿Cómo surge la materia nueva en este esquema? Hoyle no dio ninguna explicación sino que postuló la creación como un hecho de la naturaleza que alguna vez habría que entender con una nueva física.

Si bien, en un principio, esta teoría despertó cierto interés, cayó en desgracia cuando fue descubierta la "radiación de fondo", una fuerte evidencia de que el Universo estuvo mucho más caliente en el pasado y que, por lo tanto, se encuentra en plena evolución. En un intento por adecuar su teoría, Hoyle propuso entonces que la radiación de fondo se debería más bien a las grandes nubes de gas intergalácticas calentadas por las estrellas. Pero el problema es que la cantidad de gas intergaláctico que se observa no es suficiente para reproducir una radiación de fondo.

Otra posibilidad, más radical, es que el corrimiento de las líneas espectrales no se deba al efecto Doppler, sino a algún otro mecanismo físico aún desconocido. Por ejemplo, se sabe que un campo gravitatorio también produce un corrimiento al rojo, pero no en forma uniforme, además, desvía los rayos de luz y, en consecuencia, las líneas espectrales también se ensanchan y la imagen de un cuerpo cósmico se vuelve borrosa. Pero tales efectos no se han observado.

Podría suceder, sin embargo, que los fotones, a medida que recorren el espacio cósmico, pierdan energía, en forma uniforme, produciendo también un corrimiento al rojo, sin que éste se deba al movimiento de las galaxias. Según esta hipótesis, llamada del "fotón cansado", el Universo sería estático; sin embargo, no hay ninguna explicación de por qué la luz debería perder energía mientras atraviesa el espacio vacío.

También es importante notar que la base teórica de la Gran Explosión es la relatividad general de Einstein, que ha sido confirmada con mucha precisión a escala del Sistema Solar (movimiento de los planetas, desviación de señales

electromagnéticas, etc.). Pero que sea válida a escala del Universo es, por ahora, una hipótesis de trabajo. Incluso podría ser que la ley de Newton no se aplique a escalas cósmicas, lo cual no se puede comprobar directamente. Quizás en el futuro se encuentren razones para que no se pueda aplicar al Universo en su conjunto. Después de todo, sólo disponemos de un Universo, y no podemos hacer experimentos con él ni estudios estadísticos.

De todos modos, es justo reconocer que las alternativas a la teoría de la Gran Explosión propuestas hasta la fecha están basadas en hipótesis enteramente *ad hoc* y carecen de la coherencia y consistencia lógica que posee ésta, motivos por los cuales ha sido aceptada tan ampliamente. Si bien no todos los detalles encajan, otras opciones presentan más problemas de los que pretenden resolver.

¿Otros universos?

Si en el principio, en la era de Planck, era el campo, y si creemos al modelo del Universo inflacionario, entonces el universo visible es sólo un pedazo de algo mucho más amplio, como una burbuja en un campo que se expandió bruscamente. ¿Pero qué podemos decir de ese campo? Bien podrían formarse otros universos en regiones que se encuentran causalmente desconectadas de nosotros. Incluso podrían surgir nuevos universos en el nuestro, como "Pequeñas Explosiones"(*Little Bangs*): universos creándose continuamente unos en otros.

Habría que definir, entonces, lo que es un "universo". ¿Aquello que incluye todo? ¿No sería mejor hablar de "multiversos"? Todo esto suena a delirio, pero estas especulaciones se basan en teorías más o menos bien confirmadas de la materia en el mundo subatómico. Las teorías de la física moderna no han sido comprobadas en las condiciones fantásticas de los primeros segundos del Universo, y mucho

menos en las que se postulan en el modelo de la inflación. Se trata de extrapolaciones audaces de una teoría hasta límites no previstos. Qué tan válidas son es algo que sólo podremos comprobar indirectamente, comparando las observaciones astronómicas con predicciones teóricas.

Las especulaciones que hemos mencionado en este capítulo escandalizarían a cualquier positivista, para quien sólo tiene sentido aquello que se puede comprobar empíricamente. Pero nos encontramos ya muy lejos del positivismo que estuvo tan en boga hace un siglo.

[83] La luz emitida por una fuente luminosa que se aleja se percibe con menos energía o, lo que es lo mismo, con una longitud de onda mayor. El aumento de la longitud de onda es proporcional a la velocidad de la fuente.

[84] Véase el capítulo IV.

[85] La intención original era clasificar las señales de radio provenientes del cielo para no confundirlas con las utilizadas para radiocomunicaciones.

[86] Los otros elementos químicos se originan en el interior de las estrellas muy masivas, las cuales explotan como supernovas y desparraman por el espacio el nuevo material, a partir del cual se forman nuevas estrellas y planetas, con una composición química más variada.

[87] Véase G. Brumfiel, "Cosmology gets real", *Nature* 422: 108-110, 2003.

[88] Véase el capítulo VI.

[89] Véase el capítulo IX.

[90] Véase G. Brumfiel, *op. cit.*

[91] La temperatura de Planck es la energía de Planck dividida por la constante de Boltzmann.

XI. Antinomias

Dios mueve al jugador y éste, la pieza.
¿Qué dios detrás de Dios la trama empieza...?

J. L. Borges, *Ajedrez*

Si el tiempo tuvo un principio, ¿qué había antes del tiempo? Si el espacio es finito, ¿qué hay más allá de sus fronteras? Si la materia es indivisible, ¿cuál es su constituyente más pequeño? Si todo lo que sucede obedece leyes naturales, ¿somos responsables de nuestros actos? Si el mundo tuvo una causa, ¿qué otra causa antecedió a ésta?

En la *Crítica de la razón pura*, Kant investigó los límites a los que llega la razón humana cuando intenta contestar preguntas como éstas. Su conclusión es que la razón, por muy poderosa que sea, se pierde cuando se aventura fuera de las regiones de la experiencia y acaba por caer en especulaciones seudorracionales. Para remarcar lo anterior elaboró un "método escéptico" que consiste en presentar una tesis junto con su antítesis, y argumentar tanto a favor de una como de la otra, recurriendo a razonamientos que, en ambos casos, suenan perfectamente lógicos. De tales contradicciones, llamadas antinomias, Kant identificó cuatro básicas, la primera de las cuales tiene que ver con la finitud o infinitud del espacio y el tiempo, la segunda con la existencia de un sustrato último de la materia, la tercera con la causalidad y la libre voluntad, y la cuarta con una causa primera del mundo.

Veamos estas cuatro antinomias básicas en la perspectiva de la física moderna.

1. Finito o infinito

¿Es el Universo finito o infinito? ¿Es eterno o tuvo un principio? San Agustín contestó, medio en broma, a quien preguntaba qué hacía Dios antes de crear el mundo: "el Infierno para aquellos que preguntan estas cosas".

Con el afán de librarnos de ese infierno, Kant elaboró la primera antinomia que se refiere a la finitud o infinitud del espacio y el tiempo. En la tesis, mostró que el Universo debió tener un principio y ser espacialmente acotado; y en la antítesis demostró lo contrario.

No es nuestro propósito analizar los argumentos de Kant, sino situar el problema en el contexto de la cosmología moderna. Después de todo, los conocimientos científicos de hace dos siglos eran muy distintos de los actuales, y si bien la física de Newton estaba firmemente establecida en esa época, no se sabía prácticamente nada de lo que se extiende más allá del Sistema Solar. Además, se desconocía la existencia de espacios curvos con geometrías no euclidianas y la relación tan profunda que podían tener con la física.

Hoy en día, un cosmólogo debe recurrir, no a los vuelos de su imaginación sino a observaciones astronómicas y teorías físicas. Gracias a las matemáticas, la razón ha podido alcanzar nuevos límites, aún insospechados hace dos siglos. Pero esos límites, por mucho que hayan retrocedido, no se han desvanecido. En particular, ¿qué podemos decir ahora de la primera antinomia kantiana, con base en la cosmología moderna?

Mencionamos en el capítulo anterior que, después del descubrimiento de la expansión cósmica, surgieron dos teorías cosmológicas rivales. Según la teoría del Estado Estacionario, el Universo es eterno e inmutable en lo general, mientras que la teoría de la Gran Explosión postula un inicio y una evolución cósmica. El asunto fue resuelto satisfactoriamente con el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo, lo cual dio un fuerte sustento a la idea de que el Universo tuvo un origen y fue muy distinto en el pasado.

Se podría decir, entonces, que el tiempo no es infinito, sino que su inicio se puede situar en el "instante" de la Gran Explosión. Sin embargo, según la física moderna, tal cero queda fuera del conocimiento actual, ya que los conceptos de espacio y tiempo pierden su sentido ahí donde los fenó-

menos cuánticos y la gravitación se entrelazan, lo cual debe ocurrir en el tiempo de Planck.

Aun si algún día se llegara a tener una teoría cuántica de la gravedad, habría que tomar en cuenta que el tiempo en el mundo de los átomos pierde por completo el sentido que le damos comúnmente. Allí no se mide directamente el tiempo, sino cambios de energía. ¿Cómo describir lo que antecedió al tiempo de Planck si ni siquiera podemos aplicar el concepto del tiempo a los átomos?

En cuanto a la extensión espacial del Universo, hay que recordar que desde la época de Kant nuestros conceptos del espacio cambiaron radical-mente gracias al descubrimiento de nuevas geometrías que describen espacios curvos. Inicialmente, el mismo Einstein pensó que podría resolver el problema de la infinitud espacial con un modelo de universo cerrado, pero las observaciones astronómicas no son compatibles con esta interpretación: el espacio cósmico parece ser perfectamente plano a gran escala. Cabe preguntar, entonces, hasta dónde se extiende y si tiene sentido concebir un espacio infinito.

La solución actual del problema de la extensión cósmica debe tomar en cuenta la existencia de un horizonte cósmico, lo cual está relacionado, a su vez, con el principio del tiempo. Debido a que la velocidad de la luz es finita, mientras más lejos miramos en el Universo, más atrás vemos también en el tiempo; por ejemplo, una galaxia a dos millones de años luz se ve actualmente como era hace dos millones de años. Si el Universo nació hace 13 mil 500 millones de años, sólo podemos saber de sucesos que ocurrieron dentro de un radio de 13 mil 500 millones de años luz: ése es el horizonte cósmico. Además, la situación es más complicada porque el Universo se expande y, por ende, los objetos lejanos exhiben un corrimiento al rojo (es decir, una pérdida de energía de la luz que emitieron) que depende de su distancia.

A unos 13 mil millones de años luz vemos el Universo en forma de plasma, cuando todavía no se habían formado los

primeros átomos: es el Fuego Primordial que, debido a la expansión cósmica, observamos alejándose de nosotros a una velocidad cercana a la de la luz. Si pudiéramos penetrar el Fuego Primordial, "veríamos", en el límite, la Gran Explosión misma, alejándose a la velocidad de la luz, pero su corrimiento al rojo sería infinito, lo cual implica que no podemos detectar ninguna luz emitida en ese momento inicial. La posición de la Gran Explosión marca el horizonte cósmico que nos rodea por completo, homogéneamente. Más allá de unos trece mil millones de años luz, todo está causalmente desconectado de nuestra posición en el espacio y el tiempo, y nada podemos percibir.

Así, lo que se puede decir dentro del marco de la cosmología moderna con respecto a la primera antinomia kantiana es que la física no puede, por ahora, escudriñar la era de Planck, ni describir lo que se encuentra más allá del horizonte cósmico (lo cual no impide, empero, elaborar teorías y especular al respecto). De todos modos no se trata de una resolución de la antinomia, sino más bien de una aceptación de las limitaciones de nuestras teorías y un delineamiento claro de sus límites... aunque la tentación de rebasarlos sigue latente.

2. El último átomo

Demócrito decía que la materia está hecha de partículas indivisibles; la realidad última e incondicionada de la materia sería el "átomo", que etimológicamente es *no-cortable.* La concepción concuerda con los conocimientos modernos, pero los físicos se apresuraron demasiado en llamar así lo que parecía ser el constituyente más básico de la materia. Lo que desde hace un siglo se conoce como átomo es, en realidad, un objeto hecho de partículas aún más elementales: electrones y cuarks.

La naturaleza se asemeja a esas muñecas rusas contenidas una dentro de otra. ¿Existe una muñeca última y más pequeña? ¿O se trata de una sucesión jerárquica sin fin? La segunda antinomia kantiana aborda el problema de si la materia es o no indefinidamente divisible. Si el mundo no estuviera hecho de partes simples, arguyó Kant en la tesis, podríamos dividirlo hasta que, en el límite, nada quede y no haya sustancia. Pero es igualmente válida la antítesis: si existen partes simples, éstas se encuentran en el espacio que siempre es divisible, por lo que también tendría partes aquello que supuestamente es indivisible. De donde se concluye que cualquier razonamiento que trate de elucidar esta cuestión cae irremediablemente en contradicciones.

¿Cuál es la situación de este problema a la luz de la física moderna? Como mencionamos ya, los constituyentes más básicos de la materia son los electrones y los cuarks. Pero nada nos garantiza que éstos sean indivisibles: quizás algún día se descubra experimentalmente que están hechos de entes aún más fundamentales.

Mientras no se demuestre lo contrario, cuarks y electrones, en las teorías modernas, se consideran partículas puntuales, sin ningún tamaño. Es importante notar, sin embargo, que el tamaño de un átomo no está determinado por sus partículas constituyentes, sino por el campo electromagnético que rodea al núcleo y los electrones; del mismo modo, el tamaño de un núcleo atómico se debe al campo de fuerzas entre los cuarks. En contra de la concepción original de Demócrito, para quien sólo había átomos y vacío entre ellos, entre los constituyentes puntuales del átomo moderno se encuentra el campo. De hecho, una partícula puntual sería la fuente del campo que llena todo el espacio.

Pero una partícula puntual es un concepto puramente matemático que no corresponde a nada tangible en el mundo material. ¿Tienen los electrones o los cuarks alguna estructura o son estrictamente puntuales? Hasta ahora, los cálculos basados en el supuesto de que sean puntos con-

cuerdan muy bien con los datos experimentales, pero quizás, en el futuro, se revelen discrepancias con mediciones más precisas.

Al respecto, vale la pena mencionar que en los años sesenta surgió una ingeniosa teoría que consistía en suponer que los ladrillos más elementales de la naturaleza no son partículas puntuales, sino cuerdas. Cada modo de vibración de éstas correspondería a una cierta partícula elemental, tal como una cuerda de guitarra emite notas distintas según la frecuencia de vibración. Siguiendo con esta analogía, las partículas elementales serían distintas "notas" de una cuerda microscópica.

La teoría era interesante, pero desgraciadamente se topó con varios problemas que la hicieron caer en el olvido, sobre todo porque, por la misma época, surgieron los cuarks que llegaron para quedarse. Pero unos años después apareció una nueva versión que en su momento causó muchas expectativas entre los especialistas: la teoría de las *supercuerdas.*[92]

Una peculiaridad de la teoría de supercuerdas es que sólo funciona en un hipotético espacio de muchas dimensiones. En la última versión de la teoría, las supercuerdas deberían existir en un mundo de... ¡diez dimensiones! De éstas sólo percibimos las cuatro de nuestro espacio-tiempo común; en las otras dimensiones, el espacio se "enrolla" sobre sí mismo y, para detectarlas, sería necesario "ver" distancias extremadamente pequeñas, del orden de la longitud de Planck. Se suele ilustrar este hecho con el ejemplo de una manguera: de cerca es una superficie de dos dimensiones, pero a gran escala parece una línea de una sola dimensión.

El tamaño característico de una supercuerda sería la longitud de Planck y sus vibraciones corresponderían a partículas elementales. Por desgracia, la idea en su versión más simple no funciona porque la primera partícula que predice debería tener una masa comparable a la de Planck, que es billones de veces mayor que la de cualquier partícula cono-

cida. Empero, los fanáticos de la teoría han encontrado maneras de darle la vuelta a esta dificultad, aunque a costa de introducir hipótesis adicionales. El hecho es que, después de un inicio muy prometedor, la teoría ha sido incapaz de predecir algo comprobable; podría muy bien considerarse una nueva rama de las matemáticas, pero tal parece que todo el asunto está restringido a ese misterioso mundo paralelo de las ideas matemáticas.

De todos modos, por lo que respecta a la divisibilidad del espacio, hay que tomar en cuenta que medir distancias en el mundo atómico tiene peculiaridades muy propias. Como una consecuencia del principio de incertidumbre de Heisenberg, determinar la posición de una partícula con mucha precisión requiere "verla" con luz cuya energía es mayor. En el límite, estrictamente hablando, no se puede "ver" nada más pequeño que la longitud de Planck, y para ello se necesita luz con una energía comparable a la energía de Planck. Esto está totalmente fuera de cualquier posibilidad, incluso en situaciones extremas de fenómenos cósmicos, salvo en la era de Planck en el principio del Universo. En los grandes aceleradores modernos, las partículas elementales se hacen chocar entre sí a velocidades muy cercanas a la de la luz con el fin de determinar sus estructuras a partir de las reacciones producidas, pero las energías que alcanzan están quince órdenes de magnitud por debajo de la energía de Planck. Debido a las limitaciones prácticas de la energía, la detección de una estructura sólo se puede realizar con cierto margen de error.

En cuanto a si una supercuerda es simple o tiene partes, no se puede dar una respuesta en el marco de la misma teoría. Una vez más nos enfrentamos al mundo de Planck, donde los conceptos de espacio y tiempo pierden su sentido usual. El campo es lo incondicionado. La segunda antinomia de Kant sigue sin resolución, ya que la razón no puede penetrar hasta un supuesto constituyente último y más fundamental del mundo. Lo cual, sin embargo, no impide a la físi-

ca moderna intentar adentrarse cada vez más dentro del pozo sin fondo que parece ser la estructura de la materia.

3. Causalidad y libertad

El principio de causalidad dice que a toda causa corresponde un efecto, y viceversa. Esto parece evidente para la materia inanimada que obedece leyes naturales, pero conduce a problemas insuperables cuando se trata de entender a los seres vivos y pensantes que tienen libre voluntad.

Hay una tendencia entre algunos científicos a querer reducir el funcionamiento de la mente a procesos fisicoquímicos en el cerebro, como si éste fuera una computadora y a cada uno de sus estados internos correspondiera algún pensamiento o acción. Llevando esta suposición a sus límites, un criminal no sería más responsable de sus actos que una roca que cae debido a la gravedad. Se trata evidentemente de un punto de vista demasiado simplista ante la inmensa variedad y complejidad de los fenómenos psíquicos, ¿pero cómo explicar que haya libertad en un mundo regido por las leyes naturales?

Aparentemente sólo hay dos posibilidades. O bien las leyes de la naturaleza no se aplican a los procesos mentales, o bien no hay tal cosa como libre voluntad y todo se reduce, en última instancia, a física y bioquímica. La tercera antinomia de Kant aborda este problema. Kant mostró que, con discursos lógicos, se pueden demostrar las dos posibilidades, de donde concluyó que se trata de un problema metafísico que la razón pura no puede resolver.

No entraremos en los detalles de sus argumentos, sino que revisaremos el problema de la libertad y la causalidad desde el punto de vista novedoso que nos ofrece la física moderna. Señalamos en el capítulo VII que, en el mundo macroscópico, la causalidad no se aplica tan simplemente; incluso antes de descender al mundo atómico, nos encontra-

mos ante el hecho de que también la física clásica está limitada en sus capacidades de predicción.

De acuerdo con la física de Newton, si conocemos las condiciones iniciales de un sistema (por ejemplo, su posición y velocidad), podemos predecir sus condiciones posteriores con las leyes matemáticas que regulan su evolución: ¡el futuro estaría enteramente determinado por unas cuantas ecuaciones! Una concepción mecanicista del mundo de esta índole se le suele atribuir a Pierre Simon Laplace, pero todo se debe a una interpretación errónea de un pasaje en la introducción de su *Teoría de las probabilidades*:

> Debemos considerar al estado presente del universo como el efecto de su estado anterior y como la causa del que va a seguir. Una inteligencia que, por un momento, conociese todas las fuerzas con las que la naturaleza está animada y la situación respectiva de los seres que la componen, si fuese suficientemente vasta para someter esos datos al Análisis, abarcaría en la misma fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del universo y de los átomos más ligeros: nada sería incierto para ella, y tanto el futuro como el pasado estarían presentes ante sus ojos.

Pero Laplace nunca pretendió que tal análisis pudiese ser posible. Muy por el contrario, escribió a continuación, en un párrafo que se suele olvidar:

> El espíritu humano ofrece, en la perfección que supo darle a la Astronomía, un débil esbozo de esta inteligencia. Sus descubrimientos en mecánica y en Geometría, aunados a los de la gravitación universal, lo pusieron en posición de comprender con las mismas expresiones analíticas los estados pasados y futuros del Sistema del mundo… Todos sus esfuerzos en la búsqueda de la verdad tienden a acercarlo sin cesar a la inteligencia que acabamos de concebir, pero de ella se mantendrá siempre infinitamente alejado.

Por ello, declaró Laplace, podemos recurrir, cuando mucho, a conceptos estadísticos para establecer la probabilidad de que ocurra algún fenómeno, pero nunca tendremos la certeza absoluta de que sucederá.

La advertencia de Laplace fue muy acertada y el tiempo le dio la razón, pues el indeterminismo está presente en el corazón de la misma mecánica newtoniana. Un siglo después de Laplace, Henri Poincaré estudió con todo cuidado un problema matemático que parecía bastante simple: ¿cómo se mueven tres cuerpos que se atraen mutuamente según la ley de la gravedad de Newton? Hasta entonces el problema de dos cuerpos había sido resuelto exactamente, pero el de tres o más sólo permitía obtener soluciones aproximadas. Poincaré encontró que el problema de los tres

cuerpos, a pesar de su aparente sencillez, escondía una estructura matemática de una complejidad insospechada.

Más recientemente, con el uso de las computadoras, las ideas de Poincaré han resurgido y son la base de lo que ahora se conoce popularmente como *teoría del caos*. La esencia de esta teoría es que incluso leyes sencillas y precisas de movimiento —perfectamente *deterministas*— producen comportamientos caóticos que sólo se pueden estudiar estadísticamente. Esto se debe a que las leyes no son suficientes para predecir la evolución de un sistema físico, sino que es necesario conocer, además, las condiciones iniciales; pero sucede, en muchos casos prácticos, que la evolución es tan sensible a estas condiciones que cualquier incertidumbre inicial, por ínfima que sea, se magnifica con el paso del tiempo hasta el punto de que se vuelve imposible hacer cualquier predicción.

Con el paso de los años, se ha hecho cada vez más evidente que muchos sistemas físicos presentan un comportamiento impredecible a pesar de obedecer leyes perfectamente deterministas. Ejemplos bien conocidos son las condiciones atmosféricas, el clima a largo plazo, el movimiento de las arenas, el flujo turbulento de un líquido, etcétera. Cualquier predicción es imposible más allá de unos instantes iniciales.

Se podría argüir que las dificultades para describir un sistema caótico son técnicas y no de principio. Quizás en el futuro, con computadoras cada vez más rápidas y versátiles, se pueda calcular cómo se comportaría un sistema caótico. Pero aun así, existe una limitación de principio con la que se topa inevitablemente en la escala de los átomos.

Según la mecánica cuántica, como ya mencionamos, un sistema atómico se encuentra en una superposición de múltiples estados y es sólo al ser observado cuando se manifiesta en uno de ellos. Se puede calcular la probabilidad de encontrarlo en un cierto estado, pero es imposible predecir con certeza en cuál aparecerá. Se trata de una limitación

inherente a nuestras posibilidades de observar el mundo atómico, imposible por principio de superar.

Lo anterior implica que puede haber una parte intrínsecamente impredecible en el funcionamiento físico del cerebro. Un defensor distinguido de este punto de vista fue el neurólogo John Eccles, premio Nobel por sus trabajos sobre los mecanismos de la sinapsis. Eccles, junto con el filósofo Karl Popper, argumentó que la conciencia no se puede reducir sólo a procesos fisicoquímicos en el cerebro debido a la indeterminación irreducible de la física atómica. Incluso calculó alguna vez la probabilidad, de acuerdo con la mecánica cuántica, de que ocurra una transmisión sináptica. Sin embargo, no es obvio que la física cuántica aporte algo concreto a la comprensión del funcionamiento del cerebro, más allá de la constatación de que hay procesos impredecibles y arrojar algunos números.

En ese sentido, la crítica de Kant a este tipo de intentos de explicación sigue tan vigente. Para él, la contradicción desaparece si aceptamos el hecho de que un objeto debe entenderse en dos sentidos: como apariencia (para nosotros) y como cosa en sí. Esta posición, por cierto, coincide perfectamente con la interpretación de Copenhague: las leyes de la física —como el principio de incertidumbre— sólo se aplican a los objetos en cuanto apariencias.

4. La causa del Universo

¿Tiene sentido preguntar cuál fue la causa del Universo? Para decidirlo, conviene establecer qué se entiende por "causa". Pensemos en términos de causas y efectos: todo fenómeno tiene una causa que lo produjo, pero ésa, a su vez, fue producida por otra, y así sucesivamente. La pregunta básica, entonces, es si hay una cadena de causas y efectos que termine en una última causa que no dependa de ningu-

na otra. Pero nada nos impide preguntar cuál fue la causa de esa última causa, y así sucesivamente...

Todo consiste, entonces, en decidir qué es lo que vamos a aceptar como "incondicionado", es decir, aquello que no necesita otras condiciones para su existencia y estamos dispuestos a aceptar sin más explicaciones. De lo incondicionado, los filósofos se han ocupado desde hace siglos; antiguamente, hablaban de la "sustancia" como lo incondicionado y de los objetos sensibles como accidentes de esa sustancia.

La cuarta (y última) antinomia de Kant aborda el problema de la existencia de un ser absolutamente necesario para el Universo. Una vez más, Kant muestra que los argumentos lógicos conducen a resultados contradictorios.

¿Cómo se ve este conflicto desde la perspectiva de la cosmología moderna? En la actualidad, los cosmólogos teóricos han echado mano de todas las teorías físicas desarrolladas en el siglo XX para explicar el origen del Universo. Pero ya vimos que en todos los intentos, el concepto básico al que se recurre es, como de costumbre, el del campo. Los cosmólogos modernos prefieren hablar de la era de Planck, cuando el espacio y el tiempo fluctuaban en forma impredecible por efectos cuánticos. En esa era no había ni partículas ni luz, sólo un "campo". Luego, ocurrió la inflación, fase de expansión muy violenta del Universo. ¿Qué produjo la "inflación"?: ¡un campo! Hasta se le puso un nombre: el "inflatón".

¿Termina ahí la serie de causas y efectos? Uno muy bien puede preguntarse cuál es la causa del inflatón, pero para eso no hay respuesta. Los físicos modernos aceptan el campo como lo incondicionado, tal como la sustancia de los antiguos filósofos.

Gracias a los grandes avances en física y astronomía del último siglo, se puede decir algo coherente sobre las causas muy remotas del Universo, describir su evolución y hacer predicciones concretas y comprobables. Ésa es la gran dife-

rencia con la ciencia de la época de Kant. La astronomía y las matemáticas modernas nos han permitido llegar a causas cada vez más remotas del mundo, pero la causa primera y necesaria siempre escapará a la razón.

Tesis y antítesis

Al intentar resolver los problemas anteriores, Kant mostró que se presentan dos caminos, que llamó tesis y antítesis. El primero consiste en detenerse en algún punto y postular que hemos encontrado la causa primera e "incondicionada", la cual aceptamos sin exigir más explicaciones. El segundo conduce a buscar siempre una causa que anteceda a otra, sin nunca llegar a una básica e irreducible.

Al respecto, la física moderna ha establecido un límite al conocimiento de lo pequeño y lo grande que nos permite ver el problema en una nueva perspectiva. Si seguimos el primer camino, tenemos que aceptar que no tiene sentido hablar del principio del tiempo o de la frontera del espacio; incluso se puede especular que el espacio y el tiempo en la escala de Planck forman una estructura turbulenta e impredecible. En cuanto a los límites del espacio, el problema se puede soslayar gracias al hecho de que el Universo se expande y existe un horizonte cósmico más allá del cual no se puede ver. Lo mismo puede decirse de la constitución de la materia: los átomos están hechos de dos clases de cuarks y electrones; todavía se puede especular sobre si éstos están hechos de objetos aún más básicos, como serían las llamadas "supercuerdas", pero éstas tendrían que ser los entes más fundamentales del mundo material. En cuanto al problema de la libre voluntad, si bien hay discusiones sobre sus límites, lo cierto es que aceptamos en la práctica que, salvo casos extremos de locura, somos responsables de nuestros actos; de lo contrario no habría leyes éticas y morales, sino sólo física y bioquímica. Finalmente, respecto a la causa del

Universo, los creyentes invocan la intervención divina, mientras que los astrofísicos y cosmólogos, independientemente de su fe, buscan una explicación científica a partir de la existencia de un “campo”.

Kant señaló el hecho notable de que nuestra razón se siente más tranquila en la primera vía, al aceptar una causa original e irreducible que no requiere más cuestionamientos. En cambio, la segunda vía, que consiste en buscar siempre una causa anterior, es perfectamente válida en cuanto método lógico, pero no satisface a la razón, que se cansa de buscar causas cada vez más profundas.

En una perspectiva moderna, podemos decir que la razón se conforma con detenerse en el horizonte cósmico, remontar sólo hasta el tiempo de Planck, aceptar que los cuarks y electrones —y quizá las supercuerdas— son los constituyentes más fundamentales de la materia, admitir que la voluntad es irreducible a leyes naturales, y creer en una causa primera del Universo. Sin embargo, la segunda vía también es válida y no hay motivos obvios para descartarla.

[92] El prefijo *súper* se refiere a que la nueva teoría trata en un mismo plano a dos tipos distintos de partículas elementales: los fermiones, asociados a la materia, y los bosones, asociados a las interacciones. Cualquier descripción que unifique los dos tipos de partículas merece para los físicos el calificativo de *súper*.

XII. Tiempo circular

Yo suelo regresar eternamente al eterno retorno...
J. L. Borges, “El tiempo circular”,
Historia de la eternidad

En *Timeo* (39-c), Platón escribe que el tiempo se mide con los movimientos cíclicos del Sol y la Tierra, pero los planetas también definen ciclos. Siendo desiguales las velocidades de los siete cuerpos celestes y la esfera estelar, todos ellos tardan un cierto tiempo, el Año Perfecto, en completar un ciclo y regresar a una misma posición. Platón no podía calcular la duración de ese ciclo con los datos a su disposición, pero es del orden de varios cientos de miles de años, dependiendo de la precisión con la que se quiera definir una coincidencia de las posiciones planetarias.

La idea de fondo, independientemente de cualquier especulación metafísica, es que los cuerpos en movimiento regresarán alguna vez a una misma posición si disponen del tiempo suficiente. El futuro se vuelve pasado y el pasado, futuro, en ciclos interminables, en aparente violación de la Segunda Ley; pero, como ya lo indicamos, esta ley sólo dice que es inmensamente más probable ir al futuro que al pasado, mas no que sea imposible. Todo acaba por suceder si se espera lo suficiente. Volveremos a entrar en el mismo río de Heráclito cuando sus átomos y los de nuestro cuerpo se vuelvan a reunir en una misma configuración en el remotísimo futuro.

En la “Doctrina de los ciclos”, Borges resume así el Eterno Retorno:

> El número de todos los átomos que componen el mundo es, aunque desmesurado, finito, y sólo capaz como tal de un número finito (aunque desmesurado también) de permutaciones. En un tiempo infinito, el número de las permutaciones posibles deber ser alcanzado, y el universo tiene que repetirse.

A continuación, hace una cuenta simple del número de permutaciones posibles en un supuesto universo con sólo diez átomos, para luego declarar que, para cantidades más grandes, su paciencia no le permite seguir con un “*indoloro y casto despilfarro de números*”. Por fortuna, la notación ex-

ponencial nos permite hacer tal despilfarro sin mucho dolor: el número de átomos en el universo visible se calcula del orden de 10^{80} y el número de permutaciones de ese desmesurado número de átomos resulta ser algo así como $10^{10^{82}}$.

Sin embargo, Borges no toma en cuenta que, además de intercambiar átomos entre sí, éstos también se desplazan en el espacio y cambian continuamente sus velocidades. Considerando todas estas posibilidades, nos enfrentamos a lo que en física matemática se conoce como "ciclo de Poincaré", un concepto más riguroso que el Año Platónico. Hace ya un siglo, el gran matemático francés demostró que todo sistema mecánico que obedece las leyes de la física de Newton debe regresar a su punto de partida en algún momento. Este hecho parece contradecir flagrantemente la segunda ley de la termodinámica, pero la paradoja se puede solucionar tomando en cuenta que un ciclo de Poincaré tarda, en casos comunes, billones de veces la edad del Universo. El Eterno Retorno no está prohibido por las leyes de la física, pero su duración rebasa todo lo concebible. Empero, si el Universo es eterno, entonces, alguna vez en el lejanísimo futuro podría repetirse una misma situación, por muy improbable que eso sea: quizás vuelva a surgir una nueva Tierra, con seres idénticos a los que la habitamos actualmente, en un tiempo que nos parecería infinito pero no lo sería estrictamente. Si se dispone de una eternidad, sólo es cuestión de paciencia.

Gödel, Einstein, Kant

El nombre de Kurt Gödel está permanentemente asociado al famoso teorema que demuestra la imposibilidad de construir un sistema lógico libre de contradicciones y en el cual, además, cualquier proposición pueda probarse o refutarse.

Gödel huyó de su natal Austria al comenzar la Segunda Guerra y se estableció en la Universidad de Princeton, don-

de conoció a Albert Einstein, otro ilustre refugiado político. Los dos grandes científicos desarrollaron una estrecha amistad que habría de perdurar hasta la muerte del físico en 1955.

Seguramente influenciado por su amigo, Gödel empezó a interesarse en la teoría de la relatividad general. En 1947, publicó un trabajo que, hasta la fecha, sigue despertando interés por sus extrañas implicaciones; se trata de una solución de las ecuaciones de Einstein que representa un universo en rotación. Lo curioso es que, en el universo de Gödel, es posible dar la vuelta y regresar no sólo al mismo punto en el espacio —tal como en el universo cerrado de Einstein—, sino también al mismo instante en el tiempo. En otras palabras, existen trayectorias de eterno retorno, sin distinción entre pasado y futuro.

Para entrar en un ciclo de eterno retorno, una nave espacial tendría que moverse a una velocidad cercana a la de la luz y recorrer una distancia comparable al radio del Universo. En realidad nada indica que el Universo verdadero sea semejante al modelo de Gödel, pero ésa no es la cuestión. Más bien, la conclusión es que la distinción entre pasado y futuro no está implícita en la teoría de la relatividad, ya que esta teoría no excluye el eterno retorno. La construcción de una máquina del tiempo debe estar restringida por algún otro principio fundamental.

Por supuesto, el regreso en el tiempo implicaría una serie de paradojas relacionadas con la posibilidad de encontrarse a uno mismo en el pasado. Pero el ciclo podría equivaler a millones de veces la edad actual del Universo, lo cual no excluye que alguna vez en el remotísimo pasado hayamos existido en las mismas condiciones. “Tan abominable doctrina”, en palabras de Borges, no es fácil de refutar.

En un ensayo filosófico[93-94] que escribió con motivo del septuagésimo aniversario de Einstein, Gödel retoma la idea de Kant de que el tiempo no es más que una forma de percepción. En particular, argumenta que la teoría de la relati-

vidad elimina la noción de un tiempo absoluto y el concepto de simultaneidad, lo cual, para Gödel, es una evidencia de que el tiempo no tiene una realidad objetiva. Incluso, esta teoría ni siquiera excluye la posibilidad de un tiempo circular, como muestra la existencia de una solución como la que él encontró. Así, concluye: "Tenemos una prueba inequívoca para el punto de vista de aquellos filósofos como Parménides, Kant, y los idealistas modernos, que niegan la objetividad del cambio y consideran a éste una ilusión o una apariencia producto de nuestro modo especial de percepción."

En su respuesta al planteamiento de su amigo, Einstein[95] reconoce la seriedad del problema. El hecho de que el futuro no pueda influir causalmente sobre el pasado está relacionado con la ley del aumento de la entropía, pero eso sólo se aplica a dos sucesos suficientemente cercanos. Decir que un suceso A antecede a un suceso B tiene sentido físico gracias a esta ley, pero no es evidente, reconoce Einstein, que el orden causal siga teniendo sentido si A y B están muy separados entre sí en el espacio, como sucede en el universo de Gödel.

Gödel dejó a su muerte varios manuscritos que no se había decidido a hacer públicos. Entre ellos se cuentan varias versiones previas del ensayo mencionado,[96] en los que presenta en forma más elaborada su posición con respecto a la filosofía de Kant, con quien manifiesta estar parcialmente de acuerdo: admite su concepción del tiempo como una forma de percepción, pero duda que lo mismo se pueda aplicar al espacio. Hay que recordar, sin embargo, que escribió en una época en la que todavía no se había establecido plenamente la existencia de la acción fantasmal, que conduce a replantear el concepto de espacio.

Además, Gödel presenta una interpretación suya de las cosas en sí, cuya similitud con las cosas del mundo cuántico no se le escapa: los átomos son inaccesibles directamente a nuestros sentidos, y su existencia es ajena al espacio y al tiempo. Al respecto, considera que el punto de vista de Kant

"...debe ser modificado si uno quiere establecer acuerdo entre su doctrina y la física moderna; es decir, debe presuponerse que el conocimiento científico es capaz, al menos parcialmente y paso a paso, de ir más allá de las apariencias y aproximarse al mundo de las cosas en sí".

En otra parte de esos manuscritos aparece un pasaje significativo que Gödel, por razones desconocidas, eliminó de la versión final. Menciona las contradicciones propias de un viaje en el tiempo: uno podría regresar al pasado, encontrarse a sí mismo y hacerle (hacerse) algo que, según la propia memoria, nunca sucedió. Pero esta situación se basa en:

> ciertas decisiones por parte del viajero, cuyas posibilidades uno presupone vagamente a partir de la convicción de la libre voluntad. Prácticamente las mismas inconsistencias... se pueden derivar de la suposición de causalidad estricta y libre voluntad... En consecuencia... [el universo de Gödel] no es más absurdo que un mundo sujeto a la causalidad estricta.

Así, Gödel retoma muy apropiadamente el viejo problema de si existe la libre voluntad en un mundo regido por las leyes naturales. Si todos nuestros procesos mentales se pueden reducir a procesos fisicoquímicos en el cerebro, ¿cómo podemos pretender que somos responsables de nuestros actos? El hecho de regresar al pasado y decidir "asesinarse" a sí mismo de niño, no es menos absurdo que tomar cualquier otra decisión en forma libre. Podemos quedar atrapados en un ciclo de Poincaré.

Sin embargo, las contradicciones desaparecen si, como lo señala Kant en su primera *Crítica*, entendemos un objeto en dos sentidos: como apariencia (para nosotros) y como cosa en sí. Las leyes de la física sólo se aplican a los objetos en cuanto apariencias, de donde resulta que no hay contradicción en que la voluntad sea libre y, al mismo tiempo, sujeta a las leyes de la naturaleza. Para citar una vez más a Borges (en "Doctrina de los ciclos"):

> A falta de un arcángel especial que lleve la cuenta, ¿qué significa el hecho de que atravesamos el ciclo tres mil quinientos catorce, y no el primero de la serie o el número trescientos veintidós con el exponente dos mil? Nada, para la práctica —lo cual no daña al pensador. Nada, para la inteligencia —lo cual ya es grave.

Si el tiempo es sólo una forma de percepción, si sólo se encuentra en los fenómenos, en las cosas para nosotros, si es sólo una variable en las ecuaciones de la física, entonces

el tiempo circular de Gödel, el Eterno Retorno y las máquinas del tiempo no son conceptos contradictorios. No conducen a ninguna paradoja en el mundo de las cosas en sí, porque allí no fluye el tiempo.

[93] P. Yourgrau, *Gödel Meets Einstein: Time Travel in the Gödel Universe*, Open Court, 1999.

[94] K. Gödel, "A remark about the relationship between relativity theory and idealistic philosophy", en *Albert Einstein: Philosopher Scientis*t, P. Schilpp (comp.), Cambridge University Press, 1949.

[95] *Ibid*.

[96] K. Gödel, "Some observations about the relationship between theory of relativity and Kantian philosophy", en *Kurt Gödel: Collected Works*, vol. III, S. Feferman (comp.), Oxford University Press, 1995, p. 202.

XIII. Conclusiones

Esto no es una pipa.
Magritte

A lo largo de este libro presenté diversos argumentos para mostrar que los conceptos de espacio y tiempo no pueden definirse en forma clara y coherente, a pesar de ser partes siempre presentes y esenciales de nuestra experiencia cotidiana. Esta dificultad se encuentra incluso en el marco de la física clásica, pero es mucho más notoria cuando se trata de describir el mundo atómico: allí, además del espacio y el tiempo, la misma noción de realidad carece del sentido que se le asigna comúnmente.

Una posible solución (o al menos disolución) del problema consiste en adoptar la tesis de Kant según la cual espacio y tiempo no son propiedades de las cosas en sí, sino formas de percepción que permiten ordenar la información proporcionada por los sentidos. De acuerdo con este punto de vista filosófico, nuestra comprensión del mundo estaría basada en una combinación de lo que aportan tanto el mundo exterior como las estructuras de la mente.

Lo anterior parece contradecir el objetivismo que se suele presentar como base de los éxitos de la ciencia moderna, y cuya premisa fundamental es que toda verdad científica debe ser comprobada y cuantificada sin recurrir a sensaciones individuales y subjetivas. En este sentido, la nueva ciencia fue propugnada por filósofos naturales como Galileo, para quien el libro de la naturaleza estaba escrito en el lenguaje de las matemáticas. Así surgió, en el siglo XVII, una nueva forma de ver y estudiar la naturaleza que implicó un rompimiento drástico con el pasado.[97] El desplazamiento del sujeto fue un paso fundamental en la historia de la ciencia y se dio gracias a la abstracción matemática, pero ésta, en contraparte, sacrificó una percepción más directa de la naturaleza; en la Antigüedad, en cambio, el contacto con la naturaleza era más inmediato y se recurría poco a conceptos abstractos. Paradójicamente, el mundo se volvió objetivo

gracias a la abstracción, y la ciencia encontró sustento en las verdades matemáticas, que son universalmente válidas porque los números son los mismos para todos los humanos.

Hay que reconocer, sin embargo, que la matematización de la ciencia no tuvo un éxito tan universal como se esperaba inicialmente. En particular, el notable desarrollo de la biología mostró que la descripción matemática no conduce siempre a resultados fundamentales, siendo su utilidad más limitada que en el estudio de la materia inanimada. Incluso sin salir del marco de la física, muchos sistemas naturales estudiados en el siglo XX resultaron ser demasiado elusivos para prestarse a una descripción cuantitativa. Por supuesto, las dificultades son aún más evidentes en las llamadas ciencias humanas, donde la intervención ineludible del sujeto pone en duda cualquier intento de interpretación objetiva y cuantificable.

En este contexto, uno de los méritos de la filosofía de Kant fue volver a ubicar al sujeto humano en el centro de su universo. Kant elaboró su filosofía sin rechazar de ningún modo los triunfos de la mecánica newtoniana; quizás por ello fue más convincente que Berkeley, quien también intentó rescatar la subjetividad ante los embates de la nueva ciencia, pero enfrentándose frontalmente a ella y sin poder convencer adecuadamente a sus contemporáneos. Es cierto que después de Kant, en plena revolución industrial, los grandes avances científicos y tecnológicos desplazaron una vez más al sujeto para situarlo en un universo ajeno, infinito e inalcanzable, pero en el siguiente siglo, la mecánica cuántica, con la interpretación de Copenhague, lo volvió a colocar en el escenario. Aun así, esta interpretación fue severamente cuestionada por importantes científicos —como el mismo Einstein que tanto contribuyó a modificar las nociones de espacio y tiempo—, quienes insistieron en conservar el carácter objetivo y "realista" de la física.

En la actualidad no queda duda de que, independientemente de la interpretación que se quiera adoptar, suceden cosas muy extrañas en el mundo de los átomos que ponen en entredicho las nociones comunes de espacio y tiempo. Afortunadamente, las técnicas de laboratorio han progresado tanto en los últimos años que ya es posible hacer experimentos reales —¡no mentales!— con partículas atómicas o fotones individuales; hasta ahora todos los resultados son perfectamente consistentes con la interpretación de Copenhague. Así, podemos afirmar que la realidad misma ha perdido su sentido habitual, ya que no puede desligarse del proceso de observación. Se trata de una interesante revancha del subjetivismo que le debemos a pensadores como Bohr y Heisenberg.

Quitarles el carácter objetivo al espacio y al tiempo, como lo hizo Kant, conduce a reconocer que, por muy vasto y profundo que sea el Universo, lo que conocemos de él es una imagen construida por nosotros mismos. Por ello J. P. Sartre pudo afirmar que: "*No hay más universo que el universo humano, el universo de la subjetividad humana*".[98] ¿Cómo pretender tal cosa si la Tierra, con sus habitantes, es sólo un punto insignificante perdido en la inmensidad del Universo? La respuesta es que todo nuestro conocimiento de las estrellas y las galaxias, de las moléculas y los átomos, forma parte del mundo humano y subjetivo, aun si la existencia de estos objetos no depende de la nuestra propia. En ese sentido, estamos efectivamente en el centro de nuestro universo: el espacio y el tiempo forman parte de él, aunque se extiendan sin límites.

La física cuántica confirma la afirmación de Kant:[99] "*Es sólo desde el punto de vista humano que podemos hablar de espacio, objetos extendidos, etc.* " En efecto, los objetos del mundo atómico no tienen extensión: sólo se describen con algunos parámetros específicos como la masa, la carga eléctrica o el espín. Asimismo, son objetos que unas veces se comportan como partículas y otras como onda, dependien-

do de cómo el sujeto diseñe un experimento para observarlos. Además, electrones y fotones pueden estar simultáneamente en varias ubicaciones e influir unos en otros como si el espacio y el tiempo no existieran.

Si bien Kant no podía prever los avances de la ciencia moderna, en la actualidad podemos constatar que la física cuántica y la teoría de la relatividad nos han acercado a las cosas en sí en una forma que era imposible de imaginar en su época.

* * *

Los grandes avances de la física se lograron gracias al uso del lenguaje matemático para describir la naturaleza. En este lenguaje, espacio y tiempo son nociones matemáticas fundamentales que se relacionan con la idea intuitiva que tenemos de ellos. Los procesos físicos se describen mediante ecuaciones diferenciales, en las que aparecen funciones, variables y parámetros que se identifican con espacio, tiempo, masa, energía, campo, etcétera. Los resultados son, en muchos casos, de una precisión sorprendente, y las principales predicciones teóricas han sido plenamente confirmadas en los laboratorios. Sin embargo, si bien la realidad matemática es una magnífica representación del mundo, no es idéntica a él… como tampoco el dibujo de una pipa es una pipa.



La Trahison des images, *René Magritte. (D. R. © René Magritte/Adagp, París/Somaap, México, 2004. Se reproduce con autorización.)*

En resumen, las ecuaciones de la física son muy convenientes para describir la realidad. Pero, a pesar de su indudable relación con conceptos intuitivos y fenómenos observables, identificar ideas matemáticas con objetos y propiedades materiales conduce, tarde o temprano, a situaciones paradójicas. En los capítulos anteriores, argumenté que una manera de eliminar las contradicciones consiste en interpretar al espacio y al tiempo como propiedades de los fenómenos, es decir, manifestaciones para el sujeto, propias de sus estructuras mentales, tal como propuso Kant hace dos siglos.

En todo caso queda pendiente un importante problema que no era obvio antes de los éxitos científicos del siglo XX: ¿por qué las matemáticas son tan eficientes para describir una parte sustancial del mundo? Quizá es éste el misterio más profundo de la física moderna… pero eso será tema de otro libro.

[97] En la nueva ciencia, la geometría de Euclides, con su método de axiomas, definiciones y teoremas, se volvió el modelo a seguir. Grandes pensadores como Descartes, Newton, Leibniz, Spinoza y muchos más, se empeñaron en crear una ciencia universal sustentada en el razonamiento lógico puro. Así, por ejemplo, Leibniz quiso basar todo el conocimiento científico en procesos lógicos que se aplicarían siguiendo reglas bien establecidas; un poco a la manera de las computadoras actuales. Un programa así empezó a tomar forma en los *Principia* de Newton, que inician, como era de esperarse, con una estructura similar a la de Euclides.

[98] J. P. Sartre, *El existencialismo es un humanismo,* Quinto Sol, México, 1985.

[99] I. Kant, *Crítica de la razón pura.*

Apéndice

Correlaciones cuánticas y desigualdades de Bell[100]

El propósito de este apéndice es analizar las correlaciones entre fotones, para así contrastar las predicciones clásicas con las cuánticas y llegar a la esencia del teorema de Bell. Este apéndice complementa lo expuesto en el capítulo VII; su contenido es un poco más técnico, por lo que puede ser omitido si el lector no está familiarizado con conceptos básicos de la óptica y la mecánica cuántica. Lo importante son las conclusiones expuestas en el párrafo final.

Polarización

Según la óptica clásica, si se hace pasar luz polarizada por un filtro polarizador, la intensidad de la luz transmitida disminuye por un factor $\cos^2\theta$ con respecto a la incidente, siendo θ el ángulo entre el filtro y la dirección de polarización de la luz (figura A.1). En principio, se podría decir algo semejante si se interpreta a la luz como un conjunto de fotones y se adopta una interpretación estadística: de N fotones que lleguen a un polarizador, pasarán $N\cos^2\theta$ de ellos. Pero, ¿qué sucede si llega un solo fotón?

La física cuántica, en la interpretación de Copenhague, ofrece la siguiente explicación. El estado de un fotón, *antes* de ser observado, es una superposición de dos estados de polarización, perpendiculares entre sí; *después* de la observación, sólo uno de esos estados se vuelve real. Esto se puede expresar de la siguiente forma en términos de la función de onda del fotón:[101]

$$|\Psi\rangle = c_0\,|\,0\,\rangle + c_{90}\,|\,90\,\rangle \qquad (1)$$

donde c_0 y c_{90} son las amplitudes de probabilidad para observar el fotón con cierto ángulo de polarización, digamos 0° y 90° con respecto a alguna dirección dada, y donde $|0\rangle$ y $|90\rangle$ son las funciones de onda de cada uno de esos dos estados.

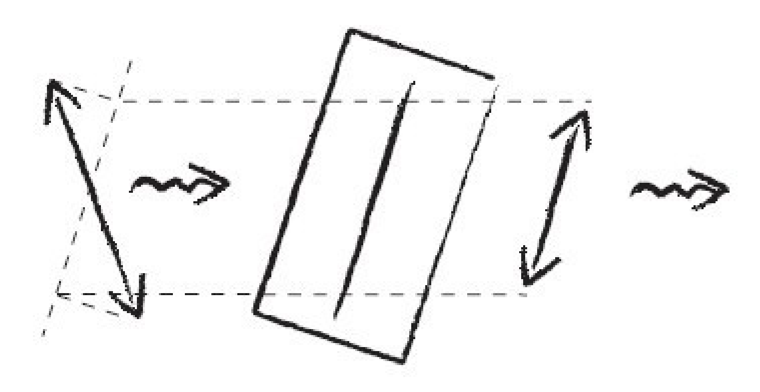


Figura A.1

Es importante notar que los estados están definidos con respecto a una dirección totalmente arbitraria, pero si colocamos un filtro polarizador, conviene tomar esa dirección como la del filtro. Se puede decir, entonces, que si el fotón pasa por el filtro, su polarización se vuelve paralela a él y adquiere realidad como tal; y si no pasa, su polarización se vuelve perpendicular. En consecuencia, la función de onda, dada originalmente por la ecuación (1), se *colapsa* a $|0\rangle$ o $|90\rangle$, según el resultado de la observación y la orientación del filtro.

Estados enredados

Consideremos ahora el caso de dos fotones emitidos desde un origen común (esto puede ocurrir por transiciones electrónicas en algunos átomos). La mecánica cuántica predice que si el espín total del par es cero, su función de onda tiene la forma:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|0\rangle_1 |90\rangle_2 - |90\rangle_1 |0\rangle_2\right) \qquad (2)$$

donde $|0\rangle_i$ y $|90\rangle_i$ (i = 1, 2) son los estados de polarización de cada fotón con respecto a una dirección arbitraria. La ecuación (2) define un típico estado enredado.

Según la interpretación de Copenhague, al poner un filtro al paso de uno de los fotones y registrar si pasó o no, las polarizaciones de *ambos* fotones adquieren realidad física, q*uedando perpendiculares entre sí.* Si, por ejemplo, el fotón 1 se observa en el estado paralelo, la función de onda dada por la ecuación (2) se colapsa a $|0\rangle_1\ |90\rangle_2$ y, por lo tanto, el fotón 2 adquiere realidad en el estado perpendicular, *pero con respecto al filtro que observó al fotón 1.*

Clásico vs. cuántico

En su artículo de 1964, Bell mostró que es posible distinguir cuantitativamente entre la predicción de la mecánica cuántica y la de cualquier otra teoría basada en un mecanismo clásico. Para describir la esencia del análisis de Bell, analicemos el caso de los dos fotones descritos en el párrafo anterior. Veamos qué se esperaría observar según la óptica clásica y según la interpretación de Copenhague.

Versión clásica

Supongamos que un fotón llega a un filtro; si el ángulo entre éste y su polarización es a, entonces la probabilidad de que pase es

$$P_+(\alpha) = \cos^2\alpha,$$

y la de que no pase es

$$P_{-}(\alpha) = \text{sen}^2\alpha,$$

(de aquí en adelante, el subíndice " + " o "–" indicará el hecho de que el fotón pase o no pase). Tomando en cuenta que el ángulo de polarización es completamente aleatorio, podemos integrar sobre todos los ángulos posibles (dividiendo, además, por un factor de peso 2π) y obtener:

$$\int_0^{2\pi} P_{+}(\alpha)\,\frac{d\alpha}{2\pi} = \frac{1}{2}\,,$$

lo cual simplemente nos dice que el fotón, en general, pasará por el filtro con una probabilidad total de ½.

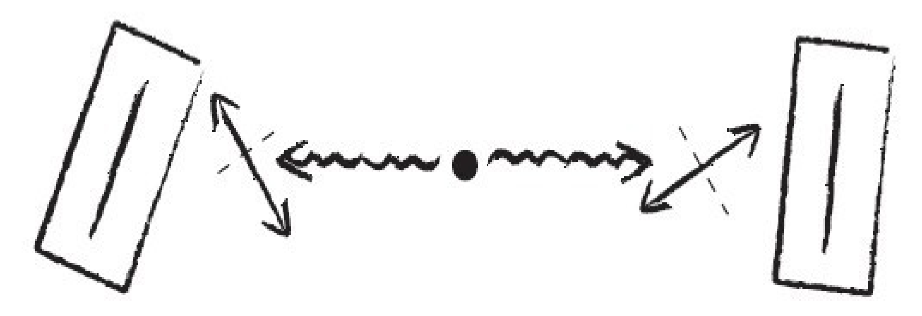


Figura A.2

Hasta aquí no hay ningún misterio. Veamos ahora el caso de dos fotones emitidos con sus polarizaciones al azar, pero mutuamente perpendiculares, tal como se ve en la figura A.2. Supongamos que el fotón de la izquierda pasa por su filtro; por lo tanto, la probabilidad de que el de la derecha pase por el otro filtro es $\text{sen}^2(\theta - \alpha)$, donde θ es el ángulo entre los dos filtros. La probabilidad conjunta de que los dos fotones pasen por sus respectivos filtros resulta ser, entonces:

$$P_{++}(\alpha, \theta) = \cos^2\alpha\ \text{sen}^2(\theta - \alpha)$$

en notación obvia. Si ahora integramos sobre todos los ángulos α, llegamos al resultado:

$$\int_0^{2\pi} P_{++}(\alpha, \theta)\, \frac{d\alpha}{2\pi} = \frac{1}{8} + \frac{1}{4}\,\mathrm{sen}^2\,\theta\ .$$

Unos cálculos enteramente análogos, que no vale la pena repetir, conducen a las probabilidades conjuntas de que pasen o no pasen ambos fotones:

$$P_{++}(\theta) = P_{--}(\theta) = \frac{1}{8} + \frac{1}{4}\,\mathrm{sen}^2\,\theta\ . \qquad (3a)$$

$$P_{+-}(\theta) = P_{-+}(\theta) = \frac{1}{8} + \frac{1}{4}\cos^2\theta\ . \qquad (3b)$$

Por lo pronto podemos sacar un par de conclusiones de estas fórmulas. En primer lugar, si bien las probabilidades conjuntas dependen del ángulo θ entre los dos filtros, el mecanismo no permite adivinar este ángulo haciendo mediciones sólo en un lado. Si tenemos acceso a los datos de uno de los filtros y desconocemos los resultados del otro, entonces lo único que podemos decir es que la probabilidad de que sí pasen los fotones por uno de los filtros, por ejemplo el de la izquierda, es:

$$P_{++}(\theta) + P_{+-}(\theta) = ½, \qquad (4)$$

lo cual no depende de θ .

Otra conclusión importante es que todas estas probabilidades conjuntas, dadas por las ecuaciones (3), oscilan entre $^1/_8$, y $^3/_8$, . Al respecto, conviene definir la *correlación*:

$$C(\theta) = P_{++}(\theta) + P_{--}(\theta) - P_{+-}(\theta) - P_{-+}(\theta), \qquad (5)$$

la cual va a ser de crucial importancia en el análisis que sigue. En el caso particular considerado:

$$C(\theta) = -½\cos(2\theta), \qquad (6)$$

de donde se ve que la máxima correlación que se puede obtener es del 50%, la cual se produce cuando los dos filtros

están alineados perpendicularmente uno con respecto al otro.

Versión cuántica

Veamos ahora la versión cuántica del mismo proceso. Como ya mencionamos, la diferencia fundamental es que, si uno de los fotones pasa por un filtro, su polarización se vuelve paralela a la dirección de ese filtro y, además, la del otro fotón *adquiere instantáneamente realidad física en dirección perpendicular a la de su compañero.*

Siguiendo con esta idea, analicemos la situación representada en la figura A.2. Supongamos que el fotón de la izquierda pasa; la probabilidad de que ello ocurra es simplemente:

$$P_+ = \tfrac{1}{2},$$

después de lo cual su polarización ya tiene realidad física y es en dirección paralela a la del filtro. Pero entonces el fotón de la derecha también adquiere una polarización, que es perpendicular a la de su compañero. La probabilidad de que pase el de la derecha es, por lo tanto:

$$P_+ = \mathrm{sen}^2\theta,$$

y la probabilidad conjunta de que pasen los dos fotones es:

$$P_{++}(\theta) = \tfrac{1}{2}\mathrm{sen}^2\theta.$$

Del mismo modo, se puede comprobar que las cuatro probabilidades conjuntas son:

$$P_{++}(\theta) = P_{--}(\theta) = \tfrac{1}{2}\mathrm{sen}^2\theta, \quad (7a)$$

$$P_{+-}(\theta) = P_{-+}(\theta) = \tfrac{1}{2}\cos^2\theta\ . \quad (7b)$$

Si bien en estas fórmulas aparece el ángulo entre los filtros, éste no se puede determinar haciendo mediciones en un solo lado. La situación, en este aspecto, es semejante al

caso clásico descrito más arriba ya que se sigue cumpliendo la ecuación (4).

Sin embargo, hay una diferencia esencial. Cada probabilidad conjunta oscila entre 0 y ½, mientras que en el caso clásico, como ya vimos, esas mismas probabilidades varían entre $^1/_8$ y $^3/_8$. Si calculamos la correlación cuántica, dada por la ecuación (5), ésta resulta ser:

$$C(\theta) = -\cos(2\theta), \qquad (8)$$

es decir, el doble de la clásica, y oscila entre −1 y + 1. En particular, la máxima correlación que se puede obtener es del 100%, que corresponde al caso en el que los dos polarizadores se encuentran a 90° uno con respecto al otro. Esta diferencia con la situación clásica es fundamental.

¿Correlaciones perfectas?

La diferencia entre los casos clásico y cuántico se manifiesta en las correlaciones. El caso extremo corresponde al de los dos filtros perpendiculares entre sí, caso en el que la mecánica cuántica predice una correlación perfecta del 100%, mientras que la óptica clásica predice sólo un 50 por ciento.

Aquí se puede especular que quizás el mecanismo basado en la óptica clásica, si bien parece muy natural, podría no funcionar en el mundo microscópico. ¿Podemos inventar algún otro mecanismo que reproduzca las mismas correlaciones cuánticas? Supongamos, por ejemplo, que la condición para que pase un fotón es que el ángulo entre su polarización y el filtro sea menor que 45°, y que, de lo contrario, el fotón no pasa (ésta es una versión ligeramente modificada del caso discutido por Bell). Según este mecanismo, el fotón pasará en promedio la mitad de las veces, lo cual corresponde a lo que se esperaría. Más aún, si se ponen los dos polarizadores perpendiculares entres sí, es evidente que se obtiene una correlación del 100% entre los dos fotones.

En principio, parecería que este mecanismo, aunque menos natural, reproduce los efectos cuánticos. La diferencia, sin embargo, se manifiesta cuando los dos polarizadores no se encuentran perpendiculares entre sí, sino a un cierto ángulo θ. El lector puede deducir, con un poco de geometría, que las probabilidades conjuntas de que pasen o no pasen ambos fotones son:

$$P_{++}(\theta) = P_{--}(\theta) = {}^{\theta}/_{\pi}$$

$$P_{+-}(\theta) = P_{-+}(\theta) = {}^{1}/_{2} - {}^{\theta}/_{\pi}$$

donde el ángulo θ se expresa en radianes. Resulta entonces que la correlación está dada por la fórmula:

$$C(\theta) = {}^{4\theta}/_{\pi} - 1,$$

para θ entre 0 y $^{\pi}/_{2}$. De esta última fórmula, se puede ver directamente que este mecanismo clásico, si bien reproduce el resultado cuántico para los filtros colocados paralela o perpendicularmente, no coincide en general con la predicción cuántica dada por la ecuación (8). Por ejemplo, para un ángulo $\theta = {}^{\pi}/_{3}$, la correlación clásica es de $^{1}/_{3}$, mientras que la cuántica es ½.

Variables ocultas y el teorema de Bell

En los dos ejemplos clásicos anteriores, se puede decir que el ángulo de polarización, α, de cada fotón es una *variable oculta*. ¡Oculta para la mecánica cuántica! Según la interpretación realista de EPR, tal polarización debería tener una existencia objetiva, mientras que, según la interpretación de Copenhague, el filtro es el que la determina.

Los ejemplos anteriores muestran que es posible, en principio, distinguir entre un esquema u otro midiendo las correlaciones entre un número suficientemente grande de fotones emitidos en pares. Si bien en ninguno de los dos ejemplos clásicos que analizamos se encontró un mecanismo que

lograra reproducir en general la correlación cuántica, el lector podría preguntar si no existe, de todos modos, algún otro mecanismo clásico que sí lo haga. Quizás es cuestión de seguir buscando… pero el teorema de Bell nos dice que eso es inútil.

En su artículo de 1964, Bell demostró con argumentos muy simples que cualquier esquema basado en la existencia de variables ocultas necesariamente implica una cierta desigualdad para las correlaciones. Más específicamente, si los dos polarizadores se colocan a diversos ángulos, θ_1 y θ_2, Φ_1 y Φ_2, entonces la correlación debe satisfacer la desigualdad:

$$|C(\theta_1, \theta_2) - C(\theta_1, \Phi_2)| + |C(\Phi_1, \theta_2) + C(\Phi_1, \Phi_2)| \leq 2.$$

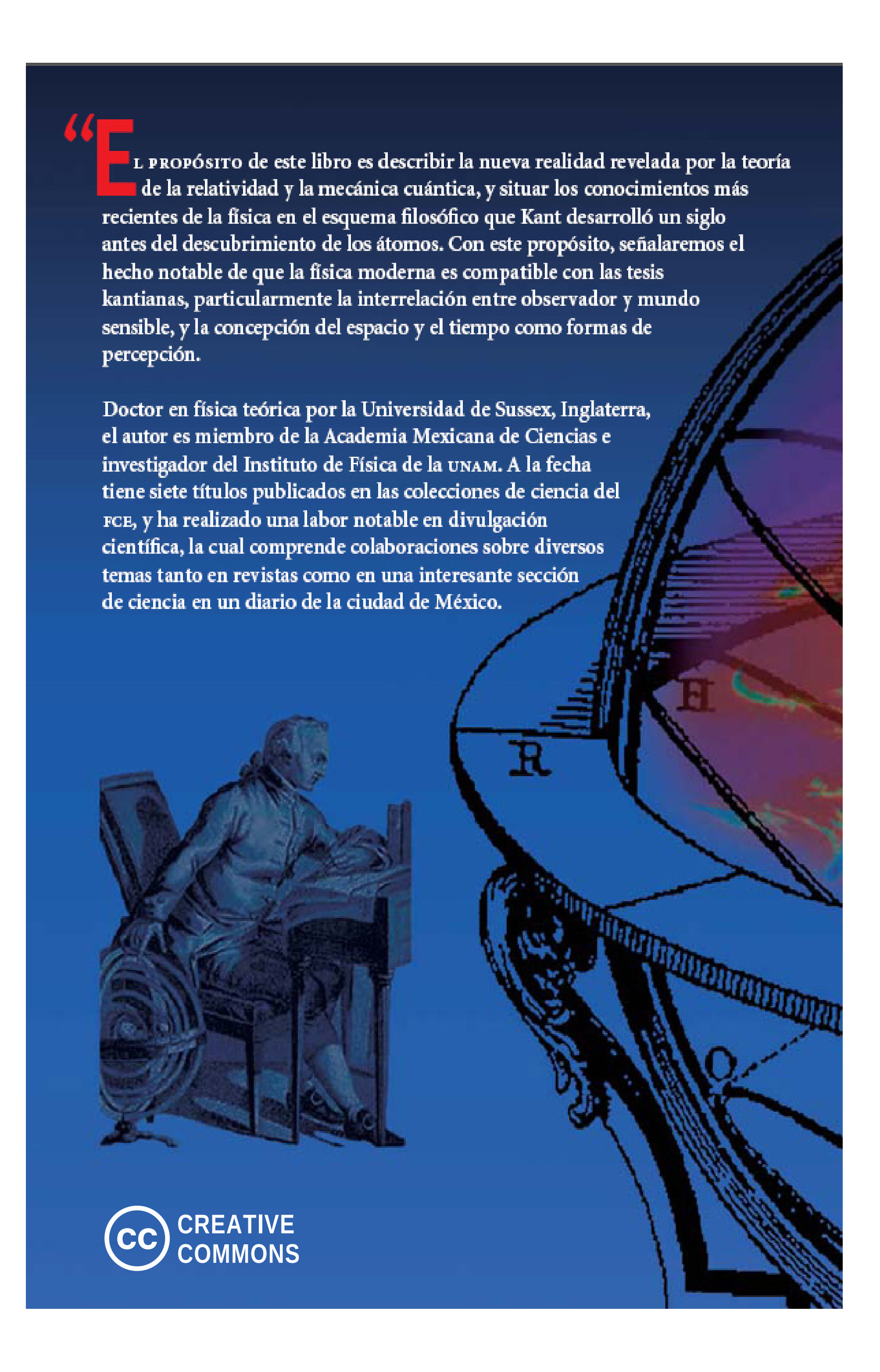
En cambio, la correlación cuántica que dedujimos más arriba, que tiene la forma general $C(\theta_1, \theta_2) = -\cos 2(\theta_1 - \theta_2)$ para orientaciones arbitrarias θ_1 y θ_2 de los filtros, viola esta desigualdad para ciertos valores de los ángulos. Es fácil comprobarlo poniendo, por ejemplo, $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 3\pi/8$, $\Phi_1 = -\pi/4$, y $\Phi_2 = \pi/8$.

Para la demostración de la desigualdad, remitimos al lector al artículo original de Bell.[102]

[100] Este apéndice matemático está basado en el artículo más extenso de S. Hacyan: “Correlaciones cuánticas y variables ocultas: ¿dónde está el misterio?”, *Boletín de la Sociedad Mexicana de Física*, enero-marzo, 2003.

[101] Utilizamos la notación de “kets” de Dirac.

[102] Véase la nota 3, capítulo VIII.



"El propósito de este libro es describir la nueva realidad revelada por la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica, y situar los conocimientos más recientes de la física en el esquema filosófico que Kant desarrolló un siglo antes del descubrimiento de los átomos. Con este propósito, señalaremos el hecho notable de que la física moderna es compatible con las tesis kantianas, particularmente la interrelación entre observador y mundo sensible, y la concepción del espacio y el tiempo como formas de percepción.

Doctor en física teórica por la Universidad de Sussex, Inglaterra, el autor es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias e investigador del Instituto de Física de la UNAM. A la fecha tiene siete títulos publicados en las colecciones de ciencia del FCE, y ha realizado una labor notable en divulgación científica, la cual comprende colaboraciones sobre diversos temas tanto en revistas como en una interesante sección de ciencia en un diario de la ciudad de México.

ÍNDICE